



Caractérisation des altérations du granite d'Auriat (Creuse). Étude de son espace poreux

Denis Leca

► To cite this version:

Denis Leca. Caractérisation des altérations du granite d'Auriat (Creuse). Étude de son espace poreux. Minéralogie. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990. Français. NNT : . pastel-00569148

HAL Id: pastel-00569148

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00569148>

Submitted on 24 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

**CARACTERISATION DES ALTERATIONS
DU GRANITE D'AURIAT (CREUSE)
ETUDE DE SON ESPACE POREUX**

THESE
présentée par

Denis LECA

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

de l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
en

GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

Soutenue le 9 mai 1990
devant le jury composé de :

MM M. ARNOULD
A. MEUNIER
F. SCHLOSSER
S. DERLICH
R. STRUILLLOU

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

78614

NS 15432

(2)

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

CARACTERISATION DES ALTERATIONS
DU GRANITE D'AURIAT (CREUSE)
ETUDE DE SON ESPACE POREUX

THESE
présentée par

Denis LECA

pour obtenir le titre de

DOCTEUR
de l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
en

GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

Soutenue le 9 mai 1990
devant le jury composé de :

MM	M. ARNOULD	Président
	A. MEUNIER	Rapporteur
	F. SCHLOSSER	Rapporteur
	S. DERLICH	Examineur
	R. STRUILLLOU	Examineur



05

RESUME

On se propose de caractériser les altérations du granite d'Auriat (Creuse) à partir d'un forage profond (1003.15 m).

Ce mémoire comprend deux volets :

- la reconnaissance des altérations du granite : études visuelle, microscopique, chimique, minéralogique et mécanique ;
- l'analyse du milieu poreux.

Tout au long de l'étude, nous sommes amenés à adapter les moyens d'investigation pour une petite quantité de matériau.

Après une revue bibliographique, nous caractérisons le granite d'Auriat et ses altérations à partir des moyens classiques : étude visuelle du sondage, microscopie optique, MEB, diffraction de rayons X, analyses chimiques à l'échelle de la roche puis du minéral, microduretés Vickers, résistance à la compression et géophysique de laboratoire. Il apparaît que les faciès que nous définissons à partir de la couleur des feldspaths (rubéfaction) correspondent à une réalité physico-chimique.

La seconde partie du mémoire débute par la mesure du volume poreux du granite. On reprend les différentes méthodes et on met au point une technique de mesure de la porosité à l'eau adaptée aux matériaux très peu poreux ($< 2\%$).

La validité de la méthode est démontrée.

La répartition des porosités en fonction des faciès montre que les granites sains sont très peu poreux ($< 1\%$ en moyenne) et les rubéfiés légèrement plus poreux (de 0 à 2 % en moyenne). La décomposition de la porosité totale en porosité de pores et de fissures montre que le faciès sain est affecté par un système de microfissures ouvertes. Le faciès rubéflé possède une porosité de pores dominante et ses microfissures sont largement colmatées.

L'essai de porosimétrie au mercure est abordé à partir des calculs utilisés en physique des hautes pressions en tenant compte des corrections de compressibilité relatives à chacun des éléments en présence. L'examen des courbes porosimétriques montre qu'il existe une infraporosité ($0.001 < r < 0.01 \mu\text{m}$) caractéristique du faciès rubéflé.

Nous mesurons la perméabilité au gaz du granite, puis calculons sa surface spécifique à partir de la porosité et de la perméabilité.

Enfin, nous présentons une synthèse des résultats et une prospective est envisagée.

AVANT PROPOS

Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté soutien, conseils et assistance à l'occasion de cette recherche.

En premier lieu mes remerciements vont à M. le Professeur Marcel ARNOULD, Professeur à l'Ecole des Mines et Professeur Honoraire à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pour l'accueil qu'il m'a réservé au Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail.

M. le Professeur Alain MEUNIER, Professeur à l'Université de Poitiers, a bien voulu accepter de participer au jury. C'est pour moi le témoignage d'un intérêt dont je lui suis très reconnaissant.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à M. le Professeur Francois SCHLOSSER, Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées qui m'honore de sa présence dans ce jury.

Je remercie M. Serge DERLICH de l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire qui m'a donné accès aux études préalables et facilité l'échantillonnage. Je lui sais gré de participer au jury.

M. Roger STRUILLOU, Maître de Recherche à l'Ecole de Mines de Paris et Directeur de thèse, a encadré mon travail. Sans compter son temps, il m'a fait profiter de sa grande expérience de chercheur en me prodiguant de précieux conseils. Je le remercie amicalement pour son esprit constructif, son anti-dogmatisme et enfin pour son humanisme.

Je remercie tout particulièrement Mme LAPEYRE, Ingénieur de Recherche au Centre de Géologie de l'Ingénieur de Noisy-le-Grand, pour son aide et ses remarques toujours judicieuses qui m'ont permis d'éviter de nombreux écueils.

Je serais coupable d'oublier dans ces remerciements Mme AUDIGUIER, Ingénieur de recherche au Centre de géologie de l'Ingénieur, qui m'a formé aux techniques de la porosimétrie au mercure et qui a suivi dans le détail toute la partie de mon travail consacrée à l'étude de l'espace poreux du granite d'Auriat.

M. DU MOUZA, Ingénieur de Recherche à l'Ecole des Mines de Paris, m'a fait profiter de son expérience dans les techniques de géophysique de laboratoire. Qu'il en soit vivement remercié.

M. BILLIOTE, Ingénieur de Recherche à l'Ecole des Mines de Paris, m'a conseillé pour l'élaboration du schéma expérimental de mesure de la perméabilité au gaz. Je le remercie pour l'aide spontanée qu'il m'a apportée.

J'ai particulièrement apprécié l'aide que m'a apportée M. GRISEZ, ingénieur élève à l'ENPC, dans le cadre de son stage d'initiation à la recherche. Je l'en remercie amicalement.

Je tiens à remercier tout spécialement mes camarades techniciens pour leur aide efficace et leur gentillesse : MM. BIHANNIC, LABERTHONNIERE, LASNIER, LESAFFRE, SOUVIROU et TALBI. Je ne saurais omettre les personnels "TUC"

dont la contribution pratique à ce travail a été loin d'être négligeable :
MM.ABALLECHE. NOUVEAU. RODAS.

Je n'oublie pas les thésards du CGI et tout spécialement MM.BRUN, GALLE et KANTE qui m'ont apporté leur amitié et leur aide, chacun dans leur domaine de compétence.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à MM.HIRSCH et LAGARDERE, Directeurs de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. et à M.VELTZ, Directeur de la Recherche pour la bourse de recherche qui m'a été attribuée.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma famille, à Carole, à mes amis et alliés. sans qui rien n'aurait été possible.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

p 1

- PREMIERE PARTIE -

CARACTERISATION DU GRANITE D'AURIAT

- CHAPITRE 1 -

CARACTERISTIQUES D'UN SITE DE STOCKAGE EN MILIEU GEOLOGIQUE PROFOND REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE GRANITE D'AURIAT

1.1.-Introduction	p 7
1.2. - Caractéristiques d'un site de stockage en milieu géologique profond	p 7
1.2.1. - Généralités	p 7
1.2.2. - Schéma type d'un site de stockage de déchets nucléaires de haute activité en milieu géologique profond	p 9
1.2.3. - Caractéristiques des déchets nucléaires de haute activité	p 9
1.2.4. - Conclusion	p 9
1.3. - Rappel des travaux effectués sur le granite d'Auriat	p 11
1.3.1. - Présentation du site	p 11
1.3.2. - Etudes réalisées par le BRGM	p 12
1.3.2.1. - Péetrographie	p 12
1.3.2.2. - Chimisme	p 12
1.3.2.3. - Fracturation	p 13
1.3.2.4. - Caractéristiques géotechniques	p 15
1.3.2.5. - Caractérisation de l'espace poreux	p 15
1.3.3. - Autres études	p 18

- CHAPITRE 2 -

CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU GRANITE D'AURIAT

2.1. - Introduction	p 19
2.2. - Caractérisation à l'oeil nu et délimitation des principales zones d'altération	p 19
2.2.1. - Présentation de l'étude	p 19

2.2.2. - Délimitation des Zones d'altérations typiques	p 19
2.3. - Etude pétrographique des altérations du granite d'Auriat, au moyen du microscope optique à transmission et du microscope électronique à balayage	p 23
2.3.1. - Introduction	p 23
2.3.2. - Texture et minéralogie du Granite d'Auriat	p 38
2.3.3. - Illustration des altérations du granite d'Auriat à partir d'une sélection de prises de vue réalisées au microscope optique	p 38
2.3.4. - Illustration des altérations du granite d'Auriat à partir d'une sélection de prises de vue réalisées au microscope électronique à balayage (MEB)	p 38
2.3.5. - Synthèse des observations aux microscopes optique et électronique	p 38
2.4. - Etude minéralogique des altérations du granite d'Auriat au moyen de la diffraction des rayons X	p 39
2.4.1. - Sélection et préparation des échantillons - dispositif expérimental	p 39
2.4.2. - Résultats	p 39
2.5. - Etude chimique des altérations du granite d'Auriat	p 41
2.5.1. - Etude à l'échelle de la roche	p 41
2.5.1.1. - Etude des analyses chimiques globales réalisées par fluorescence X et spectrophotométrie de flamme	p 41
2.5.1.1.1. - Dispositifs expérimentaux	p 41
2.5.1.1.1.1. - Analyses par fluorescence X	p 41
2.5.1.1.1.2. - Analyses par spectrophotométrie de flamme	p 42
2.5.1.1.2. - Présentation et analyse des résultats	p 42
2.5.2. - Etude à l'échelle du minéral : analyses chimiques au moyen de la microsonde électronique	p 44
2.5.2.1. - But de l'étude	p 44
2.5.2.1. - Résultats et interprétation	p 44
2.5.2.1.1. - Résultats bruts	p 44
2.5.2.1.2. - Interprétations des analyses chimiques des feldspaths	p 49
2.6. - Conclusion du chapitre	p 51

- CHAPITRE 3 -

CARACTERISATION MECANIQUE DES ALTERATIONS DU GRANITE D'AURIAT

3.1. - Introduction	p 52
3.2. - Etude mécanique des altérations à l'échelle du cristal par la mesure des microduretés Vickers	p 52
3.2.1. - Introduction	p 52
3.2.2. - Description de l'essai	p 52
3.2.2.1. - Principe de l'essai	p 52
3.2.2.2. - Matériel utilisé	p 54
3.2.2.3. - Conditions de l'essai	p 54
3.2.2.4. - Expression des résultats	p 54
3.2.2.4.1. - Symboles	p 54
3.2.2.4.2. - Formulation de la microdureté Vickers	p 54
3.2.2.5. - Causes d'erreurs	p 55

3.2.2.5.1. - Durée de l'expérience	p	55
3.2.2.5.2. - Erreurs de lecture	p	55
3.2.2.5.3. - Erreur sur la charge - Notions d'indice de Meyer et de dureté Grodzinski	p	55
3.2.2.5.3.1. - Notion d'indice de Meyer	p	55
3.2.2.5.3.2. - Détermination de la microdureté Vickers au sens de Grodzinski	p	56
3.2.2.5.4. - Mise en évidence de l'effet perturbateur du polissage sur l'état de surface du minéral testé	p	58
3.2.2.6. - Equivalence entre l'échelle de Mohs, les microduretés Vickers et Grodzinski	p	58
3.2.3. - Présentation et interprétation des résultats	p	60
3.2.3.1. - Introduction	p	60
3.2.3.2. - Difficultés rencontrées	p	61
3.2.3.2.1. - Détermination de la taille des diagonales	p	61
3.2.3.2.2. - Nombre de mesures	p	61
3.2.3.2.3. - Orientation des minéraux testés	p	61
3.2.3.3. - Traitement statistique des données de microdureté	p	62
3.2.3.3.1. - Introduction	p	62
3.2.3.3.2. - Etude des paramètres de position	p	62
3.2.3.3.2.1. - Analyse des distributions et de leurs paramètres de position	p	62
3.2.3.3.2.2. - Interprétation des résultats sur quelques exemples	p	64
3.2.3.3.3. - Etude des paramètres de dispersion	p	64
3.2.3.4. - Résultats des essais de microdureté Vickers - Etude par type de minéraux	p	65
3.2.3.4.1. - Essais réalisés sur les feldspaths potassiques	p	65
3.2.3.4.2. - Essais réalisés sur les plagioclase rubéfiés	p	68
3.2.4. - Conclusion	p	75
3.3. - Etude mécanique à l'échelle de la roche	p	75
3.3.1. - Etude mécanique des altérations à l'échelle de la roche par l'étude des vitesses de propagation des ondes soniques longitudinales et transversales	p	75
3.3.1.1. - Introduction	p	75
3.3.1.2. - Dispositif expérimental	p	76
3.3.1.3. - Formalisme	p	77
3.3.1.4. - Interprétation des résultats	p	78
3.3.1.5. - Conclusion	p	80
3.3.2. - Résistance à la compression simple	p	80
3.3.2.1. - Introduction	p	80
3.3.2.2. - Interprétation des résultats	p	80
3.3.2.3. - Conclusion	p	82
3.4. - Conclusion du chapitre 3	p	82

- DEUXIEME PARTIE -

**ETUDE DE L'ESPACE POREUX
DU
GRANITE D'AURIAT**

- **CHAPITRE 4** -

**PREMIERE APPROCHE DE L'ESPACE POREUX DU GRANITE
D'AURIAT PAR LA DETERMINATION DE LA POROSITE TOTALE.**

4.1. - Introduction	p 85
4.2. - Mesure des porosités totales par saturation à l'eau	p 85
4.2.1. - Introduction	p 85
4.2.1.1. - Buts et intérêt de la détermination des porosités totales	p 85
4.2.1.2. - Méthodologie de la mesure de la porosité à l'eau	p 86
4.2.2. - Revue des principales méthodes de détermination de la porosité totale	p 86
4.2.2.1. - Conventions de notation	p 86
4.2.2.2. - Liste des méthodes - formalisme	p 87
4.2.2.3. - Première sélection des méthodes	p 88
4.2.3. - Détermination de la porosité totale du granite d'Auriat, par mesure du poids humide après essuyage avec une étoffe humide	p 92
4.2.3.1. - Introduction	p 92
4.2.3.2. - Mise en oeuvre de l'expérience	p 92
4.2.3.3. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm	p 92
4.2.3.3.1. - Influence de l'opérateur et du degré d'humidité de l'étoffe	p 92
4.2.3.3.2. - Influence du type de papier utilisé pour l'essuyage de l'éprouvette saturée en eau	p 94
4.2.3.4. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm	p 95
4.2.3.4.1. - Influence de l'opérateur et de l'humidité de l'étoffe	p 95
4.2.3.4.2. - Influence du type de papier sec utilisé pour l'essuyage	p 95
4.2.3.5. - Relation entre les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et celle de diamètre $\phi = 10$ mm	p 97
4.2.3.6. - Conclusion	p 98
4.2.4. - Détermination de la porosité totale à partir des courbes de séchage	p 98
4.2.4.1. - Introduction	p 98
4.2.4.2. - Mise en oeuvre de l'expérience	p 99
4.2.4.2.1. - Dispositif expérimental	p 99
4.2.4.2.2. - Interprétation des courbes de séchage	p 100
4.2.4.3. - Relation entre les mesures effectuées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm, et celles de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm	p 100
4.2.4.4. - Estimation de l'épaisseur de la pellicule d'eau recouvrant les deux types d'éprouvette au début de l'essai	p 103
4.2.4.5. - Relation entre les porosités obtenues à partir des courbes de séchages et celles déterminées après essuyage de l'échantillon	p 104
4.2.4.5.1. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm	p 104

4.2.4.5.2. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm	p 105
4.2.4.6. - Conclusion	p 106
4.2.5. - Détermination de la porosité totale à partir de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales dans le milieu poreux	p 107
4.2.5.1. - Introduction	p 107
4.2.5.1.1. - Principe	p 107
4.2.5.1.2. - Dispositif expérimental	p 107
4.2.5.2. - Résultats	p 109
4.2.5.3. - Commentaires	p 109
4.2.5.4. - Conclusion	p 109
4.2.6. - Conclusion - Détermination du volume minimal de granite représentatif de la roche - Choix définitif de la méthode de mesure de la porosité totale	p 109
4.3. - Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat en porosité de pores et en porosité de fissures	p 110
4.3.1. - Détermination des indices de qualité des roches par les mesures des vitesses de propagation des ondes longitudinales	p 110
4.3.1.1. - Détermination des vitesses théoriques de propagation des ondes longitudinales dans le granite d'Auriat	p 110
4.3.1.2. - Détermination des indices de qualité	p 111
4.3.2. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pore et en porosité de fissure	p 113
4.3.2.1. - Principe	p 113
4.3.2.1.1. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures d'après l'indice de qualité I_{qsec}	p 113
4.3.2.1.2. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures d'après l'indice de qualité I_{qsat}	p 114
4.3.3. - Cas du granite d'Auriat	p 116
4.3.3.1. - Définition des diagrammes (n_f , n_p) et (n'_f , n'_p) à partir de I_{qsec} et de I_{qsat}	p 116
4.3.3.2. - Exploitation des résultats	p 116
4.3.3.2.1. - Introduction	p 116
4.3.3.2.2. - Interprétation des décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat en porosité de pores et en porosité de fissures d'après les indices de qualité I_{qsec} et I_{qsat}	p 119
4.4. - Conclusion du chapitre 4	p 123

- CHAPITRE 5 -

DETERMINATION DES SPECTRES DE POROSITE DU GRANITE D'AURIAT PAR POROSIMETRIE AU MERCURE ADAPTATION DE L'ESSAI POUR L'ETUDE DE MATERIAUX AYANT UNE FAIBLE POROSITE TOTALE (DE 0 A 3 %)

5.1. - Introduction	p 125
5.1.1. - Principe de l'essai	p 125
5.1.2. - Dispositif expérimental	p 126
5.1.3. - Choix des échantillons	p 126
5.1.4. - Présentation générale de l'étude	p 129

5.2. - Tentative de correction directe à partir des coefficients de compressibilité issus de la littérature (mercure) et des essais mécaniques classiques (granite)	p 130
5.2.1. - Définitions	p 130
5.2.2. - Correction de compressibilité du mercure	p 130
5.2.3. - Correction de compressibilité de la matrice granitique	p 132
5.2.3.1. - Introduction	p 132
5.2.3.2. - Correction de compressibilité du granite à partir des mesures de compressibilité du granite d'Auriat effectuées par le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique	p 133
5.2.3.2.1. - Présentation des résultats	p 133
5.2.3.2.2. - Commentaires - Correction des spectres porosimétriques	p 134
5.2.4. - Conclusion	p 137
5.3. - Correction à partir des coefficients de compressibilité mesurés - Relation entre les coefficients de compressibilité mesuré et absolu	p 137
5.3.1. - Correction de compressibilité du mercure - Notion de coefficient de compressibilité apparent (mesuré) et de coefficient de compressibilité absolu	p 137
5.3.2. - Mise au point d'un nouvel essai de mesure de la diminution de volume du granite en fonction de la pression	p 143
5.3.2.1. - Introduction	p 143
5.3.2.2. - Mise en oeuvre de l'essai	p 143
5.3.2.2.1. - Dispositif expérimental	p 143
5.3.2.2.2. - Description de l'essai - acquisition des données	p 146
5.3.2.2.2.1. - Modifications apportées au porosimètre CARLO-ERBA 1500 dans le but de mesurer des compressibilités - Principe de l'essai	p 146
5.3.3.2.2.2. - Variantes de l'essai	p 146
5.3.2.3. - Traitement des données expérimentales	p 147
5.3.2.3.1. - Mise en forme des données expérimentales	p 147
5.3.2.3.2. - Détermination de la part de diminution de volume due à la compression de la matrice granitique	p 149
5.3.2.3.2.1. - Formalisme - Equations d'état	p 149
5.3.2.3.2.2. - Détermination des $K_{\text{granite}}(P)$ à partir des $K_{\text{NaOH}}(P)$ tirés de la littérature	p 150
5.3.2.3.2.3. - Détermination des $K_{\text{granite}}(P)$ à partir des $K_{\text{Hg}}(P)$ tirés de la littérature	p 151
5.3.2.4. - Interprétation des résultats	p 153
5.3.3. - Conclusion	p 154
5.4. - Exploitation des résultats	p 157
5.4.1. - Introduction	p 157
5.4.2. - Commentaires	p 161
5.4.2.1. - Comparaison des porosités totales mesurées à l'eau avec celles déterminées à la fin de la 1ère injection de mercure	p 161
5.4.2.2. - Porosité piégée	p 162
5.4.2.3. - Influence du type d'altération de la roche sur l'allure des spectres porosimétriques	p 164
5.4.3. - Conclusion	p 165
5.5. - Conclusion du chapitre	p 165

- CHAPITRE 6 -

- ETUDE DE LA PERMEABILITE DU GRANITE D'AURIAT - - DETERMINATION DES SURFACES SPECIFIQUES A PARTIR DE LA POROSITE ET DE LA PERMEABILITE-

6.1. - Introduction	p 166
6.2. - Etude de la perméabilité du granite d'Auriat	p 166
6.2.1. - Principe	p 166
6.2.1.1. - Définition - Loi de Darcy	p 166
6.2.1.2. - Notion de perméabilité intrinsèque	p 167
6.2.1.3. - Notion de coefficient de perméabilité	p 167
6.2.1.4. - Validité de la loi de Darcy	p 169
6.2.2. - Acquisition des données	p 169
6.2.3. - Commentaires	p 171
6.2.3.1. - Fiabilité des mesures	p 171
6.2.3.2. - Relation entre perméabilité et faciès d'altération.	p 171
6.2.3.3. - Perméabilité - Porosité	p 172
6.2.4. - Conclusion	p 173
6.3. - Détermination des surfaces spécifiques	p 173
6.3.1. - Introduction	p 173
6.3.2. - Description des modèles de détermination des surfaces spécifiques	p 173
6.3.2.1. - Modèle considérant un écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e	p 173
6.3.2.2. - Modèle considérant un écoulement dans un tube circulaire	p 175
6.3.2.3. - Synthèse des deux modèles	p 177
6.3.3. - Exploitation des résultats	p 177
6.3.3.1. - Présentation des résultats	p 177
6.3.3.2. - Comparaison des surfaces spécifiques obtenues par mesure directe et par le calcul	p 179
6.3.3.3. - Relation entre la surface spécifique et le faciès d'altération	p 180
6.3.3.4. - Calcul des rayons moyens d'accès aux pores	p 181
6.4. - Conclusion du chapitre 6	p 183
CONCLUSION	p 185
BIBLIOGRAPHIE	p 191
ANNEXES	p 199
ANNEXE 1	p A1
Annexe 1.1 Convention des couleurs	p A1
Annexe 1.2 Colonne pétrographique du forage 0689/2x/14	p A3
Annexe 1.3 Liste des échantillons	p A77
Annexe 1.4 Liste des lames minces	p A79
ANNEXE 2	p A81
Annexe 2.1 Caractéristiques du microduromètre LEITZ	p A81
Annexe 2.2 Représentations graphiques des distributions des microduretés.	p A83

ANNEXE 3		p A93
Annexe 3.1	Mode opératoire pesée humide	p A93
Annexe 3.2	Représentations graphiques des relations entre les porosités mesurées par différentes méthodes.	p A94
ANNEXE 4	Mode opératoire de l'essai de compressibilité des roches	p A105
ANNEXE 5	Détail des calculs permettant d'accéder à la surface spécifique à partir de la porosité totale et de la perméabilité	p A127

TABLE DES SYMBOLES

Chaque symbole est accompagné des unités que nous avons le plus souvent employées

COMPRESSIBILITE :

K	Coefficient de compressibilité (/GPa).
K _D	Coefficient de compressibilité du dilatomètre en pyrex (/GPa).
K _{eau}	Coefficient de compressibilité de l'eau (/GPa).
K _g	Coefficient de compressibilité du verre déterminé par P.W.BRIGMAN (/GPa).
K _{granite}	Coefficient de compressibilité du granite (/GPa).
K _{Hg}	Coefficient de compressibilité absolu du mercure (/GPa).
K _{Hgm}	Coefficient de compressibilité apparent du mercure (/GPa).
K _{NaOH}	Coefficient de compressibilité d'une solution de soude 0.1 N.
K _v	Coefficient de compressibilité du verre (/GPa).
K _b	Module de compressibilité (GPa).
K _{bdyn.}	Module de compressibilité dynamique (GPa).
K _{beau}	Module de compressibilité de l'eau (GPa).
K _{bgranite}	Module de compressibilité du granite (GPa).
K _{bHg}	Module de compressibilité du mercure (GPa).
K _{bverre}	Module de compressibilité du verre (GPa).

CONSTANTES MECANQUES ELASTIQUES :

λ	[Coefficients de Lamé (GPa)
μ	
ν	Coefficient de Poisson
ν _{dyn.}	Coefficient de Poisson dynamique
E	Module de Young (GPa)
E _{dyn.}	Module de Young dynamique (GPa)
R _c	Résistance à la compression (MPa)

DEBIT :

Q	débit (m ³ /s)
---	---------------------------

INDICE DE QUALITE :

I _{qsat}	Indice de qualité de la roche saturée = v _{lsat} /v _{lt}
I _{qsec}	Indice de qualité de la roche sèche = v _{lsec} /v _{lt}

MICRODURETES :

H _v	Microdureté Vickers (Kg/mm ²)
H _{vg}	Microdureté Vickers au sens de GRODZINSKI (Kg/mm ²).
m	Indice de MEYER (sans unité).
d	Diagonale (μm)
P	Charge (pond ou gramme)

PERMEABILITE :

k	Perméabilité intrinsèque (Darcy).
K	Coefficient de perméabilité (m/s).

POIDS :

P _{pell}	Poids de l'eau pelliculaire (g).
P _{hum1}	Poids humide (g). <i>Technique de mesure : l'échantillon est saturé d'eau, puis essuyé à l'aide d'un tissu humide avant d'être pesé.</i>
P _{hum2}	Poids humide (g). <i>Technique de mesure : on sature l'échantillon, puis on détermine son poids humide à partir des courbes de séchage.</i>
P _{hyd}	Poids hydrostatique (g). (c'est le poids sec moins la poussée d'Archimède correspondant au volume du squelette de l'échantillon).
P _s	Poids sec (g).

POROSITE (sans unité) :

n	Porosité totale à l'eau.
n ₁	Porosité totale à l'eau. Opérateur 1 - Poids humide de l'échantillon déterminé après essuyage avec une étoffe humide.
n ₂	Porosité totale à l'eau. Opérateur 2 - Poids humide de l'échantillon déterminé après essuyage avec une étoffe humide.
n ₃	Porosité totale à l'eau. Opérateur 1 - Poids humide de l'échantillon déterminé après essuyage avec un papier hygiénique "doux".
n ₄	Porosité totale à l'eau. Opérateur 1 - Poids humide de l'échantillon déterminé après essuyage avec un papier hygiénique "dur".
n _s	Porosité totale à l'eau. Détermination du poids humide à partir des courbes de séchage.
n _v	Porosité totale à l'eau calculé à partir de la vitesses des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon sec et saturé.
n _f	Porosité de fissures (décomposition de n suivant l'indice de qualité I _{qsec}).
n' _f	Porosité de pores (décomposition de n suivant l'indice de qualité I _{qsat}).
n _p	Porosité de pores (décomposition de n suivant l'indice de qualité I _{qsec}).
n' _p	Porosité de fissures (décomposition de n suivant l'indice de qualité I _{qsat}).
n _{ng}	Porosité totale au mercure.
n _P	Porosité piégée.

PRESSION :

P	Pression (Pa, MPa, GPa, atm., Kg/mm ²)
P _c	Pression capillaire (MPa)
P _F	Pression de fermeture des fissures (MPa)

SURFACE SPECIFIQUE :

S _{sf}	Surface spécifique calculée d'après le modèle "feuilletés" (cm ² /cm ³ ou m ² /g).
S _{sp}	Surface spécifique calculée d'après le modèle "tubes" (cm ² /cm ³ ou m ² /g).
S _s	Moyenne de S _{sp} et S _{sf} (cm ² /cm ³ ou m ² /g).

VITESSE :

V _l	Vitesse des ondes soniques longitudinales (m/s)
V _{l a}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'agrégat (m/s).
V _{l a i r}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'air : 330 m/s.
V _{l e a u}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'eau : 1485 m/s.
V _{l i}	Valeur théorique de la vitesse de propagation (m/s) correspondant au i ^{ème} minéral.
V _{l m s a t}	Vitesse mesurée des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon saturé (m/s).
V _{l m s e c}	Vitesse mesurée des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon sec (m/s).
V _{l p}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'espace poreux (m/s).
V _{l s a t}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon saturé (m/s).
V _{l s e c}	Vitesse des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon sec (m/s).
V _{l t}	Valeur théorique de la vitesse de propagation (m/s) des ondes longitudinales dans le granite d'Auriat.
U	Vitesse de filtration (m/s)

VOLUME :

V _{e a u p e l l i}	Volume de l'eau pelliculaire (cm ³).
V _{D 1}	Volume du dilatomètre 1 (mm ³).
V _{D 2}	Volume du dilatomètre 2 (mm ³).
V _{D m g}	Volume du dilatomètre 3 rempli de mercure (mm ³).
V _{m g}	Volume total de mercure (mm ³)
V _t	Volume total de l'échantillon (cm ³).
V _{t 1}	Volume total de l'échantillon (cm ³) : $(P_{hum1} - P_{hyd.})/O_{eau}$
V _{t 2}	Volume total de l'échantillon (cm ³) = $(P_{hum2} - P_{hyd.})/O_{eau}$
V _{t 3}	Volume total de l'échantillon mesuré au pied à coulisse (cm ³).
V _{t 4}	Volume total de l'échantillon mesuré au volumètre à mercure (cm ³).
(dV/V) ₀	Volume des fissures

DIVERS :

P _f	Perte au feu (sans unité)
n	Viscosité (centipoise)

TABLE DES ABREVIATIONS

Ab	Albite
Alt.	Altération
An	Anorthite
Ech.	Echantillon
Ex	Exemple
fig.	Figure
FK	Feldspath potassique
g.	Granite
MA	Million d'années
M.E.B	Microscope électronique à balayage
Météo.	Météorique
Mx	Minéraux
Nbr, Nbre	Nombre
Nbreux	Nombreux
Or	Orthose
Plagio.	plagioclase
Prof.	Profondeur
r., rub.	Rubéfié

LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1 Morphologie d'un site de stockage définitif pour déchets vitrifiés (d'après document ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED, 1980).
- Fig.1.2 Position du granite d'Auriat en fonction de la surface d'érosion et du temps (d'après J.C.PARNEIX 1987).
- Fig.1.3 Localisation du granite d'Auriat (Creuse).
- Fig.2.1 Colonne pétrographique du granite d'Auriat - fracturation (d'après document BRGM ,1980).
- Fig.2.2 Représentation schématique de la disposition des zones d'altération en fonction de la profondeur sur le sondage d'Auriat (d'après J.C.PARNEIX, 1987).
- Fig.2.3 Délimitation des principales zones d'altération du granite d'Auriat.
- Fig.2.4 Diffractogramme Echantillon 450.40. lame orientée naturelle.
- Fig.2.5 Diffractogramme Echantillon 450.40. lame orientée chauffée.
- Fig.2.6 Diffractogramme Echantillon 450.40. lame orientée chauffée.
- Fig.2.7 localisation des minéraux étudiés sur l'échantillon 12.00.
- Fig.2.8 Ech.12.00 - minéral A - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.9 Ech.12.00 - minéral B - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.10 Ech.272.50 - minéral A - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.11 Ech.272.50 - minéral B - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.12 Ech.272.50 - minéral C - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.13 Ech.301.80 - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
- Fig.2.14 Localisation des minéraux étudiés sur l'échantillon 825.84.
- Fig.2.15 Ech.825.84 - minéral A - localisation des points d'analyse - principaux résultats.

Fig.2.16	Ech.825.84 - minéral A - localisation des points d'analyse - principaux résultats.
Fig.3.1	Schématisation des phases de l'essai de dureté Vickers.
Fig.3.2	Exemples de détermination de l'indice de Meyer pour quelques minéraux.
Fig.3.3	Effet du polissage sur les valeurs de la microdureté Vickers.
Fig.3.4	Empreintes de Vickers sur une surface de verre (d'après notice LEITZ).
Fig.3.5	Illustration des répartitions des microduretés Vickers rencontrées.
Fig.3.6	Echantillon 513.88 - minéral N°8 : FK zoné rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.7	Echantillon 969.66 - minéral N°3 : FK zoné rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.8	Echantillon 301.80 - minéral N°2 : plagioclase rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.9	Echantillon 301.80 - minéral N°3 : plagioclase rubéfié. avec présence d'une fraction argileuse verte. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.10	Echantillon 301.80 - minéral N°4 : plagioclase rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.11	Echantillon 513.88 - minéraux N°1 & 2 : plagioclase rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.
Fig.3.12	Position des points de mesure de v_L et v_T sur la courbe de réponse (d'après P.HAMON, P.MORLIER, 1969).
Fig.3.13.	a) à c) : comparaison entre v_L et v_T en fonction des faciès d'altération. e) relation entre v_L et v_T tous faciès d'altération confondus.
Fig.3.14	Valeurs de la résistance à la compression simple r_c , en fonction des faciès d'altération.
Fig.4.1	Technique de mesure du poids hydrostatique adaptée aux échantillons de faible volume (de l'ordre de de dizaine de cm^3).
Fig.4.2	Relation entre les série de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec une étoffe humide par deux opérateurs distincts ($\phi = 20$ mm ; $H = 40$ mm).
Fig.4.3	Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec un papier absorbant sec ($\phi = 20$ mm ; $H = 40$ mm).

- Fig.4.4 Relation entre les série de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec une étoffe humide par deux opérateurs distincts ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.5 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec un papier absorbant sec ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.6 Dispositif de mesure du poids humide à partir des courbes de séchage.
- Fig.4.7.a Courbe de séchage de l'échantillon 699.12 ($\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$).
- Fig.4.7.b Courbe de séchage de l'échantillon 699.12 ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.8.a Courbe de séchage de l'échantillon 324.05 ($\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$).
- Fig.4.8.b Courbe de séchage de l'échantillon 324.05 ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.9 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage ($\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$).
- Fig.4.10 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "doux" ($\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$).
- Fig.4.11 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "dur" ($\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$).
- Fig.4.12 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "doux" ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.13 Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "dur" ($\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$).
- Fig.4.14 Comparaison des porosités mesurées à partir de 5 méthodes différentes. Représentation en fonction des faciès d'altération.
- Fig.4.15 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, d'après les coefficients déterminés par C.TOURENCQ, D.FOURMAINTRAUX, A.DENIS (1971).

- Fig.4.16 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, d'après les coefficients déterminés à partir du sondage.
- Fig.4.17 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$.
- Fig.4.18 Relation entre v_{lsec} et v_{lsat} .
- Fig.4.19 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$. Cas du granite sain.
- Fig.4.20 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$. Cas du granite sain.
- Fig.4.21 Comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$. Cas du granite sain.
- Fig.4.22 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$. Cas des mylonites.
- Fig.4.23 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$. Cas des mylonites.
- Fig.4.24 Comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$. Cas des mylonites.
- Fig.4.25 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$. Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.
- Fig.4.26 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.
- Fig.4.27 Comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.
- Fig.4.28 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$. Cas du granite rubéfié à forte porosité (> 2 %).
- Fig.4.29 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié à forte porosité (> 2 %).
- Fig.4.30 Comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié à forte porosité (> 2 %).

- Fig.4.31 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$. Cas du granite rubéfié.
- Fig.4.32 Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié.
- Fig.4.33 Comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$. Cas du granite rubéfié.
- Fig.5.1 Notion schématique de rayon d'accès d'un pore (d'après P. BOUSQUIE, 1979).
- Fig.5.2 Schéma de principe du porosimètre CARLO-ERBA 2000 WS (1984).
- Fig.5.3 Spectres porosimétriques non corrigés de quelques échantillons du granite d'Auriat.
- Fig.5.4 Spectres porosimétriques obtenus après corrections classiques sur deux échantillons de porosités totales très différentes.
- Fig.5.5 dV/V du mercure en fonction de la pression ($T = 20^{\circ}C$) calculé à partir des données de MOELWYN-HUGHES (1951)
- Fig.5.6 Correction directe de la compressibilité du mercure appliquée à la première courbe d'injection de l'échantillon 966.40 à partir des données de MOELWYN-HUGHES (1951).
- Fig.5.7 dV/V du granite en fonction de la pression. essai réalisé sur l'échantillon 243.9. granite gris à l'aspect sain (d'après document LMS, 1983).
- Fig.5.8 Correction directe de la courbe d'injection de l'échantillon 966.40 à partir de la totalité de la courbe de compressibilité du granite déterminée par le LMS (1983).
- Fig.5.9 Correction directe de la courbe d'injection de l'échantillon 966.40 à partir de la partie linéaire de la courbe de compressibilité du granite déterminée par le LMS (1983).
- Fig.5.10 Exemple de deux montées en pression réalisées sur un dilatomètre rempli de mercure (porosimètre CARLO-ERBA 2000 WS).
- Fig.5.11 Courbe de montée en pression effectuée sur un dilatomètre rempli de mercure en fonction de la pression.
- Fig.5.12 Superposition et différence des courbes $dV/V(P)$ du mercure, déterminées à partir de nos données et de celles de MOELWYN-HUGHES (1951).

- Fig.5.13 Correction de la courbe d'injection de l'échantillon 966.40
suivant l'expression :
$$dV_{\text{corrigé}}(P) = dV_{\text{mesuré}}(P) - K_{Hg}(P) \cdot V_{Hg} + K_v(P) \cdot V_D$$
- Fig.5.14 Schéma de principe du porosimètre CARLO-ERBA 1500 (1974)
- Fig.5.15 Configurations du dilatomètre placé dans l'autoclave du porosimètre CARLO-ERBA 1500 (1974) :
A : pour un essai classique de porosimétrie au mercure
B : pour la mesure de la compressibilité du granite
- Fig.5.16 configurations des dilatomètres utilisés pour déterminer le coefficient de compressibilité du granite.
- Fig.5.17 $dV/V(P)$ de l'eau à 25°C d'après R.E.GIBSON & O.H.LOFFLER (1941)
 $dV/V(P)$ de la soude 10^{-2} N à 35°C à partir de nos mesures.
- Fig.5.18 $dV/P(P)$ du dilatomètre en pyrex.
- Fig.5.19 $dV/V(P)$ absolu de NaOH 10^{-2} N à 35°C.
- Fig.5.20 Détermination du module de compressibilité K_b du granite d'Auriat (Ech.402.80 : faciès rubéfié).
- Fig.5.21.a * spectres porosimétriques corrigés.
* courbes d'injection et de retrait brutes et corrigées.
- Fig.5.21.b * spectres porosimétriques corrigés.
* courbes d'injection et de retrait brutes et corrigées.
- Fig.5.22.a Représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes.
- Fig.5.22.b Représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes.
- Fig.5.22.c Représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes
- Fig.5.23 Relation entre la porosité totale à l'eau (n) et la porosité au mercure (nHg)
- Fig.5.24 Relation entre la porosité de pore (np) et la porosité piégée (npiégée).
- Fig.5.25 relation entre la macroporosité ($n > 0.1\mu m$) et la porosité piégée (npiégée)
- Fig.6.1 dispositif de mesure de la perméabilité du granite d'Auriat.
- Fig.6.2 Schéma d'une cellule "HASSLER".
- Fig.6.3 Relation entre les coefficients de perméabilité et les faciès d'altération des échantillons étudiés.

- Fig.6.4 Relation entre la perméabilité k et la porosité totale à l'eau n .
- Fig.6.5 Relation entre la perméabilité k et la porosité de fissure n_f .
- Fig.6.6 Modèle considérant un écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e .
- FIG.6.7 Modèle considérant un écoulement dans un tube circulaire
- FIG.6.8 Relation entre les surfaces spécifiques et les faciès d'altération des échantillons étudiés.
- FIG.6.9 Relation entre les rayons moyens et d'accès aux pores, les épaisseurs moyennes des microfissures et les faciès d'altération.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Compositions modales des types G1 et G2 (% pondéraux) du granite d'Auriat en fonction de la profondeur (source : B.R.G.M, 1980).
Tableau 1.2	Compositions chimiques des types G1 et G2 (% poids). (source : B.R.G.M, 1980).
Tableau 1.3	Résultats des essais en laboratoire - Paramètres géotechniques (document BRGM, 1980).
Tableau 1.4	Résultats des mesures de porosité au mercure. (source : B.R.G.M, 1980).
Tableau 1.5	Perméabilités équivalentes du granite d'Auriat.
Tableau 1.6	Principaux résultats relatifs à la nature des produits d'altération en fonction des minéraux primaires et de la profondeur (d'après J.C.PARNEIX, 1987).
Tableau 2.1	Résultats des diffractogrammes réalisés sur lames orientées (fraction > 2 μ m).
Tableau 2.2	Analyses chimiques globales des éléments majeurs constitutifs du granite d'Auriat (en pourcentages pondéraux).
Tableau 2.3	Caractéristiques des échantillons analysés à la microsonde.
Tableau 2.4.a	Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 12.00.
Tableau 2.4.b	Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 272.50.
Tableau 2.4.c	Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 301.80.
Tableau 2.4.d	Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 825.84.
Tableau 2.5.a	Exploitation des analyses chimiques des feldspaths. Echantillon 12.00.
Tableau 2.5.b	Exploitation des analyses chimiques des feldspaths. Echantillon 272.50.
Tableau 2.5.c	Exploitation des analyses chimiques des feldspaths. Echantillon 301.80.
Tableau 2.5.d	Exploitation des analyses chimiques des feldspaths. Echantillon 825.84.
Tableau 3.1	Relations entre l'indice de Meyer m , la charge et la microdureté Hv.

Tableau 3.2	Equivalence entre l'échelle de Mohs et les microduretés Vickers(ces dernières d'après B.W.MOTT, 1956).
Tableau 3.3	Influence de de l'orientation cristallographique de cristaux de quartz et de cristal de roche sur la microdureté Vickers (d'après B.W. MOTT, 1956).
tableau 3.4	Exemples de distributions caractéristiques de microdureté.
Tableau 3.5	Correspondance entre l'étendue et la valeur moyenne de la microdureté de quelques séries caractéristiques.
Tableau 3.6 a	Résultats des mesures de microdureté effectuées sur divers échantillons et minéraux.
Tableau 3.6 b	Résultats des mesures de microdureté effectuées sur divers échantillons et minéraux.
Tableau 3.7	Caractéristiques mécaniques du granite d'Auriat déterminées d'après les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales mesurées sur 36 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm. Relation avec les altérations.
Tableau 3.8	Résistances à la compression simple R_c mesurées sur 24 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.
Tableau 3.9	Résistances à la compression simple de quelques granites (d'après J.BERGUES, J.P.CHARPENTIER, P.HABIB, 1984).
Tableau 4.1	Comparaison des porosités totales mesurées suivant 9 méthodes différentes (1) à (9) décrites dans le paragraphe 4.2.2.1.
Tableau 4.2	Comparaison des mesures des volumes totaux.
Tableau 4.3	Porosités totales où la valeur du poids humide est mesurée après essuyage. Cas des éprouvettes $\phi = 20$ mm, $h = 40$ mm. Influence du mode d'essuyage.
Tableau 4.4	Porosités totales où la valeur du poids humide est mesurée après essuyage. Cas des éprouvettes $\phi = 10$ mm, $h = 20$ mm.
Tableau 4.5	Relations entre les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et celles de diamètre $\phi = 10$ mm.
Tableau 4.6	Porosités totales déterminées à partir des courbes de séchage pour 38 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm, $h = 40$ mm et pour 38 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm, $h = 20$ mm.
Tableau 4.7	Porosités totales déterminées à partir de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales dans les éprouvettes de granite de diamètre $\phi = 20$ mm et $\phi = 10$ mm, et d'éclatement 2.

Tableau 4.8	Vitesses longitudinales moyennes dans les principaux minéraux constitutifs du granite d'après K.S.ALEXANDROV, B.P.BELIKOV et T.V.RIZOVA (1966).
Tableau 4.9	Proposition d'une charte d'évaluation du degré d'altération des roches en fonction des indices de qualité I_{qsec} d'après C.TOURENCQ et D.FOURMAINTRAUX (1971).
Tableau 4.10	Décomposition de la porosité totale en porosité de pores n_p et en porosité de fissures n_f , d'après l'indice de qualité I_{qsec} .
Tableau 4.11	Décomposition de la porosité totale en porosité de pores n_p et en porosité de fissures n_f , d'après l'indice de qualité I_{qsat} .
Tableau 4.12	Etat de la fissuration en fonction des faciès d'altération, déduit de la comparaison des indices de qualité I_{qsec} et I_{qsat} ainsi que des décompositions de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures.
Tableau 5.1	Caractéristiques des échantillons étudiés profondeur, faciès d'altération, porosité totale à l'eau à partir des courbes de séchage.
Tableau 5.2	Valeurs de K_b du mercure en fonction de la pression à 24.6°C (d'après DOLEZALEK et SPEIDELL, 1920).
Tableau 5.3	K_b du mercure en fonction de la pression à 20°C (d'après RICHARDS et STULL, 1904).
Tableau 5.4	K_b du mercure en fonction de la pression à 25°C (d'après BRIDGMAN, 1925).
Tableau 5.5	K_b du mercure en fonction de la pression à 22.8°C (d'après CARNAZZI, 1903).
Tableau 5.6	Valeurs du module de compressibilité en fonction de la pression à 20°C (d'après MOELWYN-HUGHES, 1951).
Tableau 5.7	Caractéristiques du dilatomètre utilisé pour mesurer la diminution de volume du mercure en fonction de la pression.
Tableau 5.8	Coefficients et modules de compressibilité du mercure en fonction de la pression.
Tableau 5.9	Coefficients et modules de compressibilité du mercure en fonction de la température d'après M.DIAZ PEÑA (1959).
Tableau 5.10	Références et configurations des dilatomètres qui ont été utilisé pour déterminer le coefficient de compressibilité du granite en fonction de la pression.
Tableau 5.11	Caractéristiques des dilatomètres utilisés dans la cadre de l'essai de mesure de la compressibilité de la matrice granitique.

Tableau 5.12	Modules et coefficients de l'eau d'après R.E.GIBSON et O.H.LOFFLER (1941).
Tableau 5.13	Comparaison des porosités totales à l'eau n (déterminées à partir des courbes de séchage) avec nHg.
Tableau 5.14	Porosité piégée et porosité de pores de quelques échantillons du granite d'Auriat.
Tableau 5.15	Comparaison des effectifs de la classe de rayon d'accès aux pores supérieure à 0.1 μ m dans le cas de deux séries de granites sains et rubéfiés de textures G1 et G2.
Tableau 6.1	Coefficients de perméabilité K et perméabilités intrinsèques k, du granite d'Auriat (ces valeurs sont les moyennes des mesures obtenues avec les pressions d'injections de 20 et 30 bar).
Tableau 6.2	Surfaces spécifiques calculées à partir de la porosité totale n et de la perméabilité intrinsèque k.
Tableau 6.3	Mesures de surface spécifique au krypton de quelques échantillons du granite d'Auriat (source : B.R.G.M.).
Tableau 6.4	Calcul des rayons d'accès des pores de quelques échantillons du granite d'Auriat, en fonction de la porosité totale n et de la perméabilité intrinsèque k.
Tableau 6.5	Rayons moyens d'accès des pores de quelques échantillons du granite d'Auriat, déterminés à partir des spectres porosimétriques.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche entreprise pour le compte du CEA sur le massif granitique d'Auriat (Creuse) carotté sur 1000 m.

Le projet de stockage des déchets radioactifs de haute activité en milieu géologique profond se heurte à l'éventualité d'une migration des radioéléments vers la biosphère. Dans le cas du granite, l'eau constitue le vecteur le plus plausible de transfert des radioéléments et la fissuration (du joint de grain à la fracture décimétrique), la voie la plus probable. Le système de fracturation du granite d'Auriat a été étudié dans le détail par plusieurs organismes : il en ressort que celui-ci est largement colmaté. Nous avons donc axé notre étude sur les altérations affectant la matrice de la roche : ses caractéristiques pétrologiques, minéralogiques, chimiques, mécaniques et pétrophysiques. Pour chaque type d'investigation, le problème de rareté de l'objet géologique inhérent aux sondages, nous a amené à adapter les essais classiques de Géologie de l'Ingénieur à de très petites quantités de matériau et à définir une méthodologie très stricte.

Dans une première partie, nous caractérisons le granite d'Auriat et définissons un certain nombre de faciès d'altération.

Une brève présentation du schéma d'un projet de site de stockage en formation géologique profonde suivie d'une revue bibliographique rassemblant les principaux résultats déjà obtenus sur le granite d'Auriat depuis 1980, font l'objet du premier chapitre.

L'établissement d'une colonne pétrographique du sondage et la définition de ses faciès caractéristiques d'altération ouvrent le deuxième chapitre qui se poursuit par les résultats obtenus avec les méthodes de détermination classiques utilisées en Géologie de l'Ingénieur : analyses pétrologiques (au microscope optique et au MEB), chimiques (à l'échelle de la roche et du minéral) et minéralogiques (diffraction des rayons X). Tous ces essais sont destructifs. Dès le début de l'étude, on se penche plus spécialement sur l'altération des feldspaths, en particulier celle qui affecte les plagioclases en les rubéifiant.

La première partie de ce mémoire se termine par une étude mécanique du granite d'Auriat (chapitre 3) à l'échelle du minéral (moyen : microduromètre) puis de la roche (moyens : essais classiques de résistance à la compression simple et mesures des vitesses de propagation des ondes soniques).

La seconde partie de ce mémoire est consacrée à l'étude de l'espace poreux du granite d'Auriat en fonction des faciès d'altération. Tout au long de cette étude, nous avons été confrontés à des problèmes techniques de mesure, dues aux caractéristiques intrinsèques extrêmes du granite : porosité globale (de 0 à 3%) et perméabilité (de 10^{-14} à 10^{-11} m/s) très faibles. Dans un premier temps (chapitre 4), nous avons testé une dizaine de méthodes permettant d'accéder à la porosité totale à l'eau pour des échantillons de faible volume : 1.6 et 12 cm³. La mise au point de l'essai que nous qualifions de "mesure de la porosité totale à l'eau à partir des courbes de séchage" nous permet d'approcher au mieux la porosité réelle d'un échantillon de granite très peu poreux. Cette technique permet d'augmenter la précision sur le poids humide de l'échantillon en donnant la possibilité de différencier le volume d'eau occupant l'espace poreux de celui se trouvant sous forme de pellicule à la surface de l'échantillon. On montre dans cette partie que la porosité globale du granite rubéfié est faible et peu supérieure à celle du granite à l'aspect sain.

Le volume total de l'espace poreux étant connu précisément, on a cherché dans le chapitre 5 à préciser la distribution de la porosité en fonction des rayons d'accès des pores. L'établissement de spectres porosimétriques sur des

échantillons très peu poreux a toujours posé de nombreux problèmes. En nous appuyant sur les travaux de P.W.BRIGDMAN ^{*}, nous avons adapté les calculs de correction de compressibilité employés en physique des hautes pressions, au cas de la porosimétrie au mercure. Les spectres porosimétriques ainsi traités montrent la capacité du granite rubéfié de développer une classe de microporosité importante par rapport à celle qui existe dans le cas du granite sain.

Dans le dernier chapitre, les mesures de la perméabilité combinées avec celles de la porosité, ont permis d'affecter à chaque échantillon une surface spécifique, un rayon moyen d'accès des pores ainsi qu'une épaisseur moyenne de la microfissuration.

A l'issue de ce travail, une synthèse des résultats obtenus sur les altérations présentes sur le sondage du granite d'Auriat est réalisée et un nouvel axe de recherche proposé.

*

Lauréat du prix Nobel de Physique 1946

— PREMIERE PARTIE —

CARACTERISATION
DU
GRANITE D'AURIAT
(CREUSE)

— CHAPITRE 1 —

CARACTERISTIQUES D'UN SITE DE STOCKAGE EN MILIEU GEOLOGIQUE PROFOND REVUE BIBLIOGRAPHIQUE RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE GRANITE D'AURIAT

1.1. - Introduction :

Dans un premier temps, nous situerons notre étude par rapport au projet industriel de stockage des déchets radioactifs de haute activité en formation géologique. Nous présenterons ensuite le granite d'Auriat à travers une brève revue bibliographique des principaux travaux déjà effectués.

1.2. - Caractéristiques d'un site de stockage en milieu géologique profond :

1.2.1. - Généralités :

Le projet de stockage profond en formation géologique concerne les déchets radioactifs de haute activité. Ceux-ci renferment des émetteurs Alpha issus du retraitement des combustibles irradiés. En France, ils sont solidifiés par vitrification (dans du verre boro-silicaté). On estime qu'en l'an 2000, le volume cumulé de ce type de déchets atteindra 2000 m³ (J.M.LAVIE, 1982).

Jusqu'à présent, les déchets sont stockés provisoirement en surface sur les lieux de production. Deux voies d'élimination sont possibles :

- l'une artificielle : la transmutation des émetteurs α , étudiée à l'I.S.P.R.A ;
- l'autre naturelle : la décroissance de la radioactivité des déchets confinés.

Jusqu'à présent, les efforts ont surtout porté sur cette deuxième voie (H.MOUNEY, 1980). Dans un premier temps, les pays européens se sont partagés la tâche d'étudier les différentes formations géologiques continentales susceptibles de recevoir un stockage de déchets :

- les formations salines par les Allemands et Hollandais ;
- les formations granitiques par les Anglais et les Français ;
- les formations argileuses par les Italiens et les Belges.

En ce qui concerne le granite, une première sélection a permis de recenser 104 sites possibles au Royaume-Uni et 74 en France. Une sélection ultérieure a conduit à ne retenir pour des investigations plus détaillées incluant des forages profonds, que 8 sites anglais et 2 sites français dont celui d'Auriat (Creuse).

A l'issue de nouvelles études géologiques dans quatre milieux différents (argile, granite, schiste, sel en couche), les autorités gouvernementales ont sélectionné les quatre sites dont la situation a été rendue publique en mars 1987 (J.M.POTIER, R.ANDRE-JEHAN, 1990) :

- formation argileuse de Champagne Septentrionale (Aisne) ;
- massif granitique de Neuvy-Bouin (Deux-Sèvres) ;
- schistes briovériens de la région de Segré (Maine et Loire) ;
- formations salifères du bassin bressan (Ain).

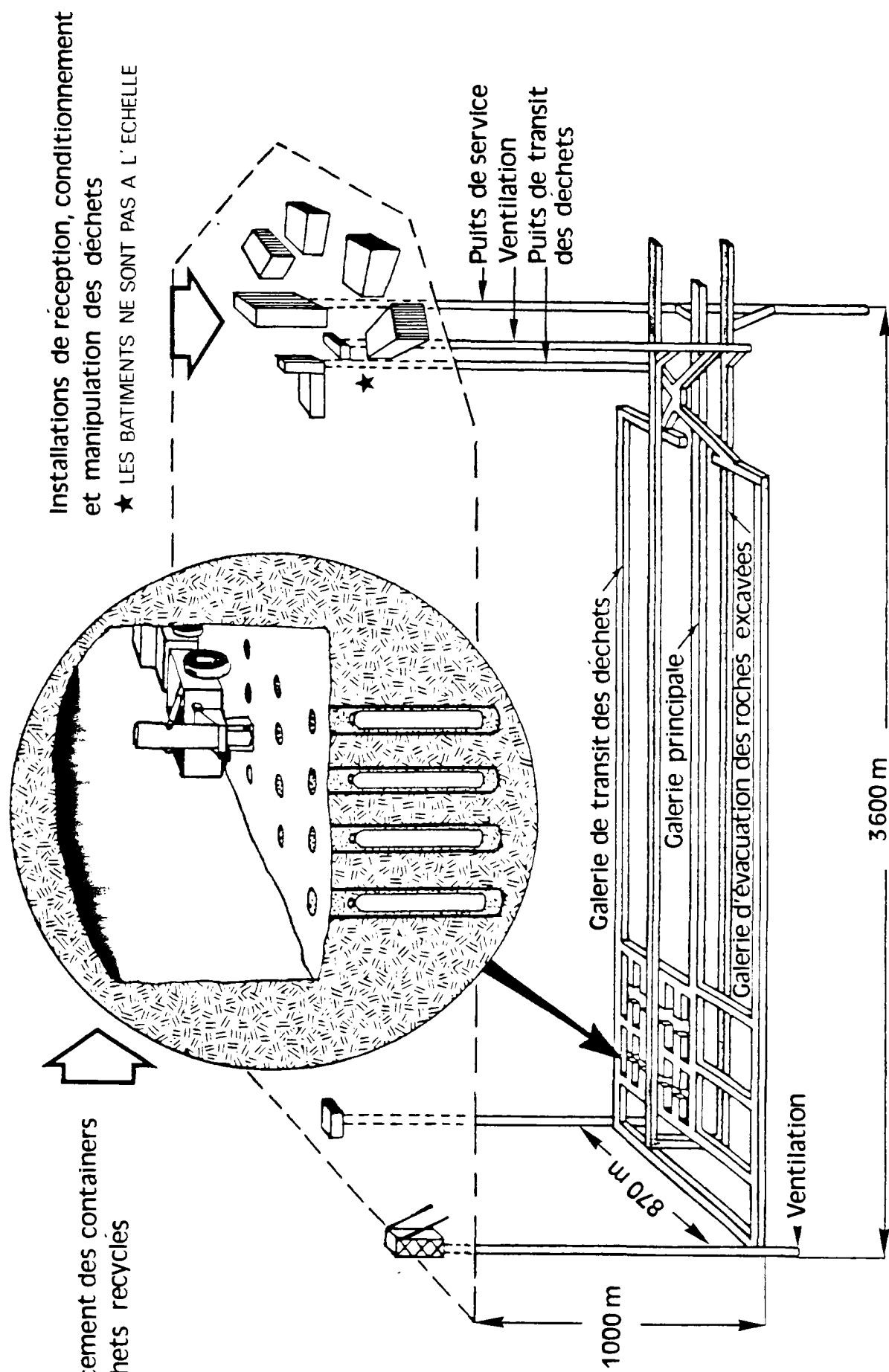


Fig.1.1: Morphologie d'un site de stockage définitif pour déchets vitrifiés
(d'après document ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED) 1980

Actuellement les pays Européens diversifient leurs recherches en étudiant souvent chacun de front les différentes formations géologiques susceptibles de recevoir des déchets radioactifs de haute activité. L'Espagne et surtout la Suède ont développé des programmes d'étude relatifs au granite. Hors d'Europe, le Canada et les U.S.A s'intéressent activement aux problèmes de stockage dans le granite.

1.2.2. - Schéma type d'un site de stockage de déchets nucléaires de haute activité en milieu géologique profond :

Pour prévenir le retour des radionucléides à la biosphère, on considère l'effet de plusieurs barrières :

- la première est le verre boro-silicaté ;
- la seconde, artificielle également, est le conteneur lui-même, auquel on peut adjoindre éventuellement un suremballage épais (V.MAURY, 1982) ;
- la barrière ouvragée entre le conteneur et la formation géologique d'accueil ;
- la barrière géologique enfin, à très long terme, constituée par les centaines ou milliers de mètres d'enfouissement, le dépôt ayant été scellé.

Le système de stockage en massif granitique prévoit le stockage à une profondeur de l'ordre de 500 m (cf.fig. 1.1). Les colis radioactifs sont placés dans des puits disposés suivant un maillage précis. Les colis sont séparés de la roche par une barrière ouvragée en argile compactée.

1.2.3. - Caractéristiques des déchets nucléaires de haute activité :

Les principaux radionucléides présents dans ce type de déchets ont les caractéristiques suivantes :

- demi-vie très longue
- émetteur de rayonnements hautement énergétiques.
- leur haute toxicité est susceptible de remettre en cause la pérennité du monde vivant, dans le cas où ils entreraient massivement en contact avec la biosphère.

L'activité et la puissance thermique sont produites par les radioéléments suivants : ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{241}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{237}Np et ^{235}U .

^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am et ^{241}Pu disparaissent au bout d'une centaine d'années.

^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu sont détruits au bout de 10000 ans.

^{237}Np et ^{235}U sont les principaux responsables de l'activité et de la puissance thermique dégagée après 1 million d'années.

Après retraitement du combustible irradié, les produits de fission vitrifiés contenant des émetteurs à vie longue engendrant un dégagement de chaleur important décroissant avec le temps, sont dits de catégorie "C".

Une température maximale de 140°C sera atteinte au cours des premières années du stockage. Cette température dépend de l'écartement des puits (*borehole*) où seront placés les conteneurs. Au bout de 1000 ans, la température devrait tomber à 60°C.

1.2.4. - Conclusion :

Etant données les caractéristiques des déchets radioactifs de haute activité et de longue période, il est nécessaire que le milieu géologique d'accueil puisse jouer son rôle de barrière pendant au moins plusieurs centaines de milliers d'années. Dans ce cadre, le granite présente *a priori* de nombreux

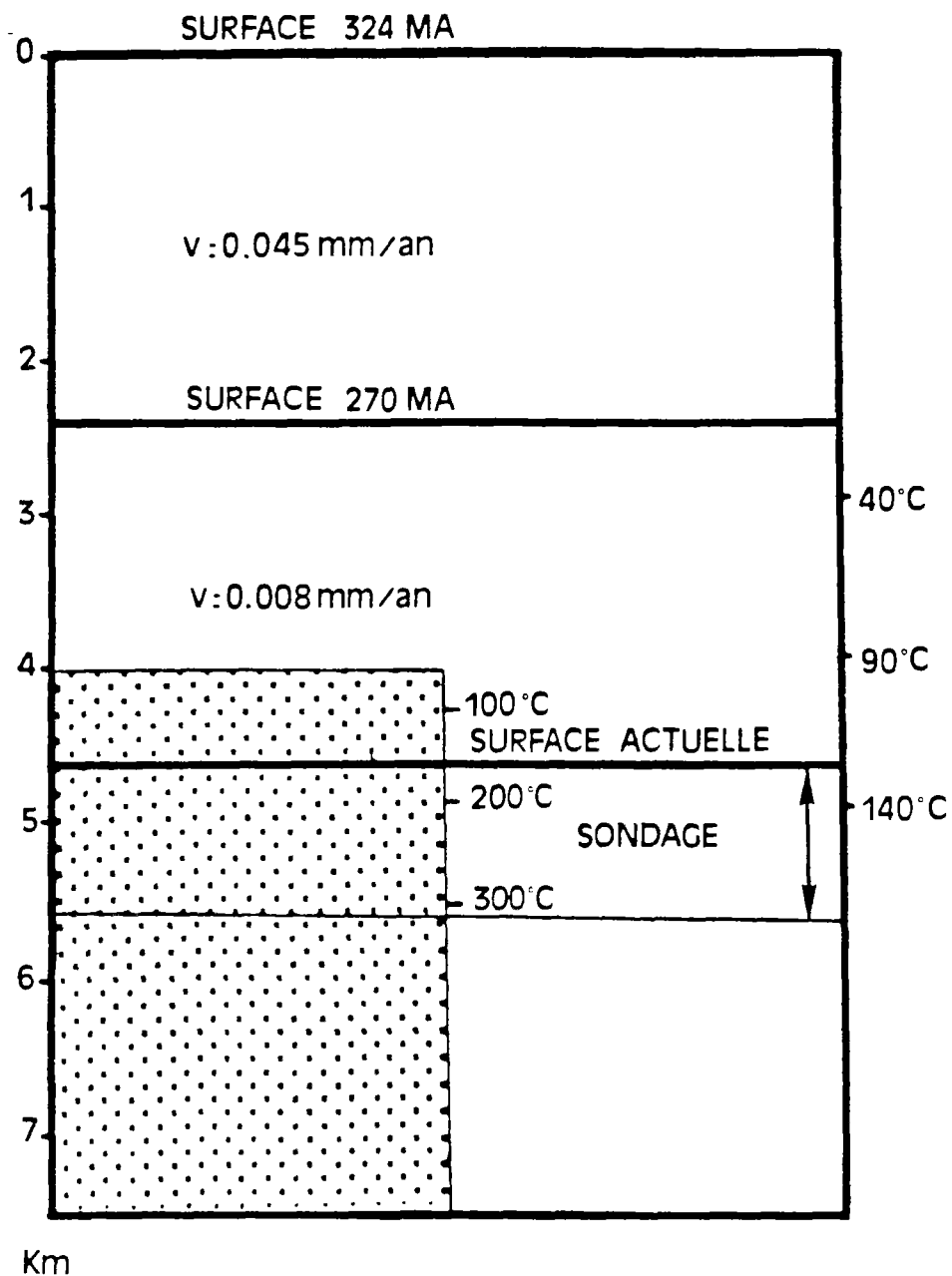
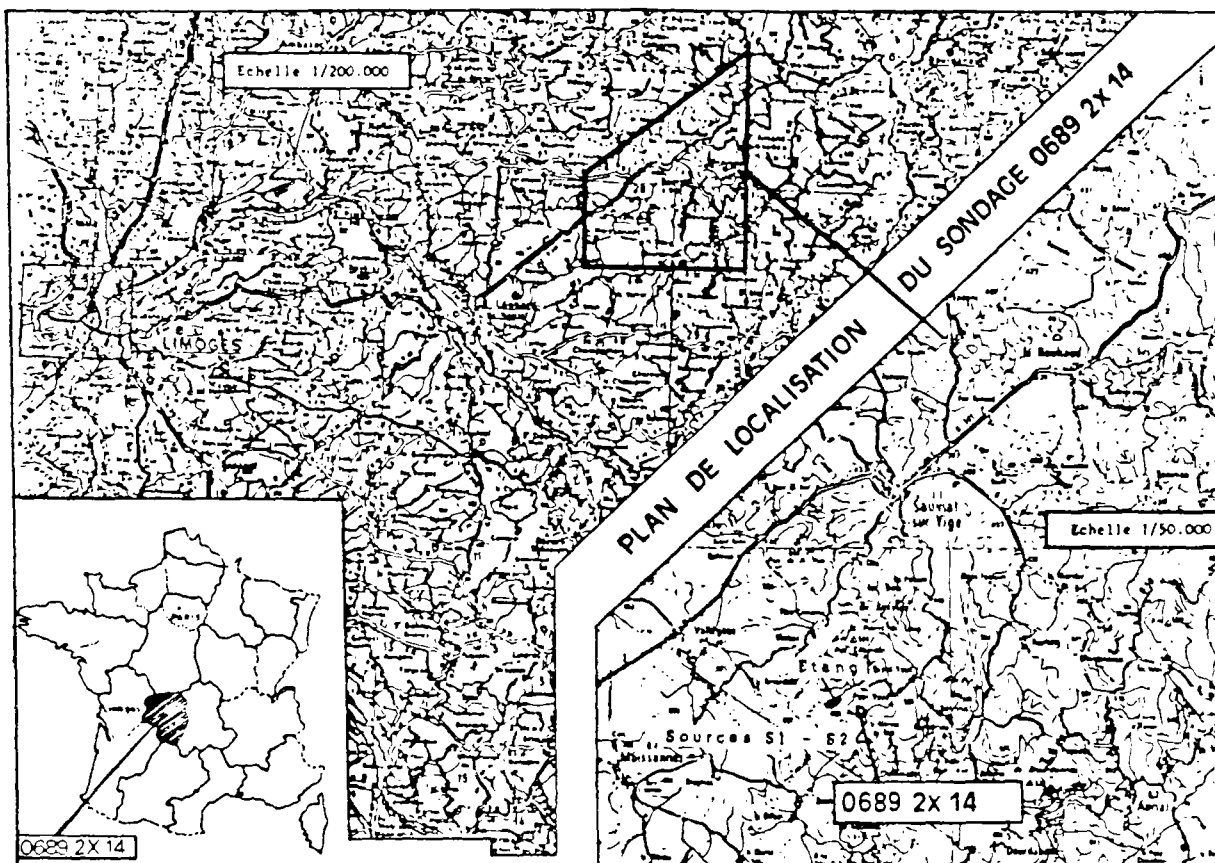


Fig.1.2 : position du granite d'Auriat en fonction de la surface d'érosion et du temps (d'après J.C PARNEIX, 1987).

Ce schéma représente l'évolution de la position de la surface du globe par rapport au granite d'Auriat, dont la fin de mise en place à 4 km de profondeur est datée à 324 MA. La vitesse moyenne d'érosion (v) de 0.045 mm/an implique que le granite se trouve à 1.6 km de la surface au moment de la mise en place du système géothermique (270 MA). Un gradient thermique normal de 50°C/km permet ainsi d'avoir une température dans la roche comprise entre 130 et 180°C à l'emplacement du sondage. L'épaisseur de 1.6 km a pu ensuite être érodée à la vitesse de 0.008 mm/an, qui est celle des Appalaches actuellement, pour que l'emplacement correspondant au haut du sondage affleure à l'heure actuelle.

FIG.1.3: LOCALISATION DU GRANITE D'AURIAT (CREUSE)



avantages : massifs de grande dimension (la position du granite d'Auriat en fonction des variations de la surface d'érosion au cours du temps est représentée sur la fig.1.2.), faible perméabilité en profondeur, possibilité de sorption ou/et de rétention de radionucléides, conductivité thermique moyenne et bonne résistance géomécanique, mais aussi des inconvénients : difficulté de modélisation du système et de l'hydrogéologie (hétérogénéité, complexité du système de fractures).

1.3. - Rappel des travaux effectués sur le granite d'Auriat :

1.3.1. - Présentation du site :

Dans le cadre d'études menées conjointement par le CEA-IPSN (Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire) et la commission des Communautés Européennes sur la recherche des milieux géologiques aptes à recevoir des déchets radioactifs, deux forages verticaux de 1000 m et 500 m de profondeur ont été réalisés au lieu dit Petit Vaux sur la commune d'Auriat (Creuse). Cet emplacement, non retenu pour les recherches de site profond d'enfouissement des déchets, présente, grâce à ces deux forages, un grand intérêt scientifique pour l'étude de nombreux sujets géologiques ou géotechniques. A part le programme de géologie profonde de la France (GPF), il n'existe aucun forage permettant un accès aux granites jusqu'à 1000 m.

Le granite d'Auriat est situé dans la partie nord-ouest du Massif Central (cf.fig.1.3). Il a été daté à 324 MA par la méthode U/Pb appliquée aux grains de monazite (GEBAUER et coll., 1981). Sa surface atteint 80 km² environ. Il appartient à un complexe granitique calco-alcalin qui se serait mis en place dans cette région à la fin du Viséen supérieur. Il est bordé au sud par le complexe mafique de Sauviat, au nord par des Gneiss Hercyniens, à l'est et à l'ouest par du métagranite (AUTRAN, 1980). Notons qu'un magmatisme lamprophyrique, daté à 290-300 MA (LEROY et SONET, 1976), a affecté le granite voisin de Saint-Sylvestre.

1.3.2. - Etudes réalisées par le BRGM :

La somme des études particulières qui ont été réalisées par cet organisme a fait l'objet d'un rapport (C.S.D.R. 81/03) dont les éléments suivants sont tirés.

1.3.2.1.- Pétrographie :

Deux faciès principaux ont été observés :

- G1 qui est un monzogranite porphyroïde à fond largement grenu hypidiomorphe.
- G2 qui est un monzogranite porphyroïde ou non à fond microgrenu panxénomorphe.

	PROFONDEURS TYPE G1						PROFONDEURS TYPE G2			
	12m	50m	102m	193m	262m	1002m	604m	655m	708m	847m
Quartz	31.85	31.37	30.26	31.13	30.58	32.33	36.39	37.60	33.45	30.4
Orthose	24.82	22.46	23.60	23.60	24.30	24.08	22.01	17.82	19.28	24.2
Plagioclase	30.89	33	34.10	33.17	33.31	30.35	28.82	29.32	29.52	31.8
Biotite	9.31	9.3	10.28	9.65	9.95	10.19	6.90	9.34	11.37	10.8
Chlorite										
Muscovite	2.47	3	1	1.46	1.36	2.95	5.29	5.46	5.79	2.8

Tableau 1.1 : Compositions modales des types G1 et G2 (% pondéraux) du granite d'Auriat en fonction de la profondeur (source : B.R.G.M. 1980).

Le passage entre les deux faciès est marqué par une bordure figée riche en biotites. Les compositions modales des deux types de granite sont très proches (cf. Tableau 1.1).

Nous pensons que la distinction entre les faciès texturaux G1 et G2 n'est pas toujours évidente. Dans le cadre de notre étude, nous serons amenés à définir des faciès d'altération indépendants des textures.

1.3.2.2. - Chimisme :

Les compositions chimiques du granite d'Auriat déterminées par le B.R.G.M varient très peu (cf. tableau 1.2). Cependant, les spécialistes du B.R.G.M estiment que certaines tendances se dégagent de l'étude géochimique fine des faciès G1 et G2 : caractère calco-alcalin pour G1 et alumineux pour G2. Ils ajoutent que ces variations n'ont aucune influence sur l'aspect "homogène" de la roche.

	PROFONDEURS TYPE G1							PROFONDEURS TYPE G2			
	12m	50m	102m	193m	262m	548m	1002m	604m	655m	708m	847m
SiO ₂	72.88	72.46	72.48	72.89	72.38	73.20	72.25	74.06	73.92	71.25	71.75
Al ₂ O ₃	13.62	13.80	13.76	13.38	13.55	13.46	14.10	13.40	13.43	13.87	14.49
TiO ₂	0.20	0.24	0.25	0.25	0.21	0.22	0.27	0.19	0.22	0.29	0.27
Fe ₂ O ₃	1.64	1.62	1.77	1.72	1.79	1.51	1.91	1.44	1.91	2.30	2.03
CaO	0.86	0.73	0.93	0.76	0.88	0.90	1.09	0.91	1.05	1.11	1.24
MgO	0.99	0.99	1.07	1.04	1.15	0.89	0.96	0.82	1.00	1.32	1.29
K ₂ O	4.94	4.71	4.73	4.84	4.82	4.65	4.89	4.54	4.13	4.56	4.98
Na ₂ O	3.54	3.88	3.91	4.07	3.85	3.08	3.11	3.23	3.13	3.17	3.21
P ₂ O ₅	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.21	0.17	0.20	0.21	0.22
MnO	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.06	0.07	0.08
Pf	0.94	1.20	0.94	1.17	0.72	1.25	0.65	0.90	0.94	1.10	0.81
Total	99.68	99.88	100.09	100.38	99.61	99.50	99.53	99.72	99.89	99.25	100.37

Tableau 1.2 : Compositions chimiques des types G1 et G2 (% poids). (source : B.R.G.M/1980).

Note : Pf = perte au feu.

1.3.2.3. - Fracturation :

Les spécialistes du B.R.G.M considèrent qu'aucune relation n'existe entre la fracturation et les caractéristiques pétrographiques du granite d'Auriat.

Ils remarquent que deux familles principales de fractures généralement colmatées se répartissent de manière homogène le long du sondage :

- 1) les fractures subhorizontales (1 famille directionnelle)
- 2) les fractures subverticales (6 familles directionnelles)

Dans l'histoire géologique régionale, le granite d'Auriat a été affecté par une tectonique cassante comportant quatre phases principales :

- compression N-S (Tardi-hercynien)
- distension ESE-WSW à NNE-SSW (Jurassique à Crétacé)
- compression NE-SW (Pyrénéen)
- compression ESE-NNW (Alpin Miocène supérieur)

Remplissage des fractures :

Les études du B.R.G.M montrent que les grandes failles sont souvent cicatrisées par du quartz et de la calcite. Dans les diaclases subhorizontales et les petites fractures à fort pendage, trois types principaux de remplissage d'origine hydrothermale ont été observés :

Essais		Masse volumique sèche	Masse volumique saturée	Masse spécifique apparente des grains	Porosité	Vitesse des ondes longitudinales	Vitesse des ondes transversales	Résistance à la compression	Résistance à la traction	Module de la déformabilité longitudinale	Coef. de Poisson	Essai de frottement
Prélèvement à la profondeur de (m)	Facteurs	γ_d T/m ³	γ_{sat} T/m ³	γ_s T/m ³	n %	V_p m/s	V_s m/s	R_c MPa	R_{tb} MPa	E MPa	ν	φ
1	205,40/205,00	2,66	2,66	2,66	0,27	$\begin{cases} 5,870 \\ 5,760 \end{cases}$			7,9	107 000	0,34	
2	204,40/204,00	$\begin{cases} 2,62 \\ 2,64 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,63 \\ 2,65 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,63 \\ 2,65 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,28 \\ 0,22 \end{cases}$	$\begin{cases} 5,760 \\ 5,550 \end{cases}$		170	8,2	80 000	0,35	$\begin{cases} 20^\circ \\ 21^\circ \end{cases}$
3	208,45/208,00	$\begin{cases} 2,63 \\ 2,64 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,63 \\ 2,64 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,63 \\ 2,65 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,28 \\ 0,26 \end{cases}$	$\begin{cases} 5,650 \\ 5,620 \end{cases}$		$\begin{cases} 177 \\ 171 \end{cases}$	7,6	88 000	0,32	
4	202,20/202,50					4 930			$\begin{cases} 6,4 \\ 6,1 \end{cases}$	47 000	0,30	
5	415,27/415,55	2,63	2,63	2,64	0,45	$\begin{cases} 5,210 \\ 4,430 \end{cases}$		160	9,0	73 000	0,31	24°
6	505,35/505,00					5 310			8,5			
	506,30/506,00	$\begin{cases} 2,61 \\ 2,62 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,62 \\ 2,62 \end{cases}$	$\begin{cases} 2,62 \\ 2,63 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,39 \\ 0,44 \end{cases}$	5 340		218				
7	608,00/608,30	2,62	2,62	2,63	0,43							
	610,00/610,25	2,61	2,62	2,64	0,45	$\begin{cases} 5,380 \\ 5,110 \end{cases}$	3 130*	137	8,7	73 000	0,29	
8	203,45/203,20	2,62	2,63	2,63	0,18	$\begin{cases} 5,930 \\ 5,950 \end{cases}$		176	13,2	88 000	0,30	
9	816,60/816,05					$\begin{cases} 5,505 \\ 5,440 \end{cases}$		146	8,5	74 000	0,33	
10	810,05/810,25	2,62	2,63	2,64	0,28	5 220		242	8,2	85 000	0,29	
11	903,25/902,40					5 680	2 970	$\begin{cases} 104 \\ 157 \end{cases}$	8,0	63 000	0,31	
12	910,68/910,80	2,63	2,63	2,64	0,27	$\begin{cases} 5,200 \\ 4,850 \end{cases}$		148	9,8	61 000	0,29	

Tableau 1.3 : Résultats des essais en laboratoire. Paramètres géotechniques (document BRGM) 1980

* Rupture subverticale suivant fissuration.

- G₁ menzengrinite porphyroïde à fond grain.
- G₂ menzengrinite porphyroïde ou non à fond micrograin.
- G₃ menzengrinite porphyroïde à poissades pépéritiques.
- G₄ menzengrinite porphyroïde catéclase.

Note 1 : Les valeurs de la porosité à l'eau données ci-dessus sont du même ordre de grandeur que les valeurs de porosité macroscopique déterminées par la méthode au mercure (moyenne 0,3 - 0,4 %).

Note 2 : V_p et V_s ont été mesurés sur des carottes ayant été préalablement saturées en eau. Les conditions de mesure en laboratoire se rapprochent donc de celles rencontrées in situ.

- **les argiles** : montmorillonite et illite. Elles ont été trouvées à toutes les profondeurs et dans toutes les familles directionnelles à fort pendage. L'illite est présente dans 50 % des fractures à partir de 520 m et la montmorillonite disparaît après 806.9 m. L'absence de kaolinite qui est généralement abondante dans les minéraux d'altération météorique, a été remarquée.

- **la calcite** : elle a été rencontrée dans toutes les familles de fractures. Toutes les diaclases subhorizontales observées, sont fermées par un film de calcite.

- **le quartz** : il semble remplir surtout certaines familles de fractures subverticales.

Le B.R.G.M estime que certaines données géotechniques et géophysiques montrent qu'à défaut de colmatage, un bon nombre de fractures doivent être fermées :

- le R.Q.D (Rock Quality Designation : rapport de la longueur de carotte récupérée par rapport à la longueur de sondage correspondante) varie de 95 à 100 %.

- tout le long du sondage, la vitesse de propagation de l'onde sonique longitudinale mesurée (5800 m/s) est proche de la valeur théorique calculée (6000 m/s).

- le rapport vitesse de l'onde de cisaillement / vitesse de l'onde longitudinale varie de 0.58 à 0.6 entre 697.0 et 711.2 m de profondeur (zone identifiée comme étant fracturée).

- les résistivités vraies du granite sont comprises entre 2000 et 120000 $\Omega.m$. A partir de 750 m, elles sont en moyenne égales à la valeur très élevée de 60000 $\Omega.m$.

En ce qui concerne les produits argileux de remplissage des fractures, J.C.PARNEIX (1987) a réalisé une étude fine et trouvé de la kaolinite dans le sondage. Sur ce point précis, nos résultats convergent avec ceux de J.C.PARNEIX.

1.3.2.4. - Caractéristiques géotechniques :

Les caractéristiques géotechniques déterminées par le B.R.G.M figurent dans le tableau 1.3.

Le granite d'Auriat semble posséder de bonnes caractéristiques mécaniques, légèrement supérieures à la moyenne des granites.

1.3.2.5. - Caractérisation de l'espace poreux :

* **porosité totale à l'eau** : les porosités à l'eau qui ont été mesurées en laboratoire sur 12 échantillons par le B.R.G.M, varient de 0.18 à 0.86 %.

* **porosimétrie au mercure** : des spectres porosimétriques au mercure ont été réalisés sur 5 échantillons (cf. tableau 1.4).

Les auteurs du rapport soulignent que la microporosité est du même ordre de grandeur que les porosités mesurées à l'eau et que pour les échantillons profonds, la porosité totale est indépendante du degré d'altération. Enfin, ils concluent en insistant sur le manque de sensibilité de la méthode en ce qui concerne la différenciation des réseaux poreux dans cette gamme de pression.

Une solution à ce problème sera proposée dans le chapitre 5.

Profondeur (m)		Macroporosité (%) > 7.5 µm	Microporosité (%) < 7.5 µm	Porosité totale (%)
12.05	(1)	0.39	0.81	1.20
	(2)	1.10	0.92	2.02
512.55	(1)	0.46	2.50	2.96
	(2)	0.34	2.65	2.99
654.00	(1)	0.30	0.60	0.90
	(2)	0.29	0.62	0.91
952.20	(1)	0.30	0.58	0.88
	(2)	0.33	0.53	0.86
1003.15	(1)	0.38	0.42	0.80
	(2)	0.37	0.43	0.80

tableau 1.4 : Résultats des mesures de porosité au mercure. (source : B.R.G.M) 1980.

notes : (1) première mesure- (2) seconde mesure.

* **mesure de la surface spécifique au krypton** : la surface spécifique a été calculée à partir de l'isotherme d'adsorption par la méthode B.E.T. (adsorbat : krypton sous une pression de 1.8 mm de mercure et à la température de l'azote liquide).

Les surfaces spécifiques varient de 0.12 m²/g (échantillon se trouvant à 1003.15 m) à 0.42 m²/g (échantillon se trouvant à 650 m).

* **perméabilité et transmissivité équivalentes** : Les test hydrauliques - chocs hydrauliques ou slug-tests, et injection entre obturateur - ont montré qu'il existait une diminution des valeurs moyennes de la perméabilité K entre 0 et 1000 m (cf.tableau 1.5).

Intervalles de profondeur (m)	Perméabilité K (m/s)
0 à 50	(1) 6 *10 ⁻⁹
60 à 250	(1) 7 *10 ⁻¹¹
250 à 540	(1) 3.4*10 ⁻¹¹ (2) 2.7*10 ⁻¹⁰
540 à 1003.15	(1) < 10 ⁻¹²

Tableau 1.5 : perméabilités équivalentes du granite d'Auriat.

(1) : choc hydraulique - (2) : injection

(source : B.R.G.M) 1980.

Au delà de 500 m. la valeur de la perméabilité est très faible (de l'ordre de 10⁻¹² m/s). On constate une diminution de la perméabilité avec la profondeur, exceptée dans des zones très fracturées : K = 3*10⁻¹ m/s entre 298 et 308 m.

PROF (m)	TYPES	D'	ALTERATION	VEINES																		BIOTITE										PLAGIO.									
				K FELDSPAR	ILLITE	1/5 10/ SMECTITE	DIOCTAHEDRAL CHLORITE	EPIDOTE	SPHENE	TRIOCTAHEDRAL CHLORITE	FLUORITE	QUARTZ	U. MINERAL	HEMATITE	PYRITE	CHALCOPYRITE	GALENE	CALCITE	DOLOMITE	ANKERITE	SIDERITE	KAOLINITE	1/5 40-90/ SMECTITE	CALCIC MONTMOR	CORRENITE	ILLITE	1511 5-10/ SMECTITE	1/5 15/ "	1/5 40-90/ "	ILLITE-DIOCT CHL - SMECTITE	DIOCTAHEDRAL CHLORITE	KAOLINITE	CALCIC MONTMOR	CALCITE	DOLOMITE	EPIDOTE	HEMATITE	LOSS OF Ca			
8.3	2	4	6																																						
35.2	2	4																																							
54.8																																									
63.5	2	4																																							
93.4	2																																								
146.6	2	4																																							
155.9	2	4																																							
170.2	2	4																																							
171.8	2	4																																							
195.5	12																																								
197.6		45																																							
202.5		45																																							
214.8		45																																							
219.1	2	4																																							
238.9		3'																																							
282.8		3'4																																							
311.6	2	4																																							
332.9	2	4																																							
345.5	2	4																																							
368.6	2	45																																							
396	2	45																																							
400.8	2	45																																							
430.1	2	4																																							
448.1	2	4																																							
495.1	2																																								
513.7		5																																							
529.1	2	5																																							
661.2		3																																							
675.8		3																																							
691.9	2	4																																							
693.6	2	4																																							
754.7	2	4																																							
786.1		45																																							
808.7	1	3																																							
846.2		34																																							
855.2	2	4																																							
960.6		3																																							
974.7		3																																							
985.3		3																																							

Tableau 1.6 : Principaux résultats relatifs à la nature des produits d'altération en fonction des minéraux primaires et de la profondeur (d'après J.C PARNEIX, 1987).

Les minéraux de l'altération hydrothermale qui ont été identifiés dans les fractures et ceux qui remplacent la biotite et le plagioclase dans chaque échantillon étudié du granite d'Auriat sont répertoriés dans ce tableau. Les différents types d'altération sont représentés par :

- 1 - granite sain
- 2 - Chloritisation pervasive des biotites
- 3 - Chloritisation (+ epidote) autour des veines subverticales
- 4 - Chloritisation (+ pyrite) autour des veines subverticales
- 5 - Argiles et carbonates ferro-magnésiens autour des veines subhorizontales à sidérite
- 6 - Altération supergène

Les petits nombres dans la colonne type d'altération indiquent une intensité plus faible de l'altération définie par le nombre correspondant. Les nombres blancs sur fond noir représentent l'ordre d'apparition des minéraux tel qu'il peut être défini par l'observation pétrographique des veines ; IS signifie interstratifié illite-smectite désordonné. Le pourcentage de smectite est indiqué lorsqu'il a pu être déterminé à l'aide des spectres de rayons X, selon la méthode de REYNOLDS (1980). L'échantillon de granite sain, localisé à 980 mètres, n'est pas mentionné dans ce tableau.

* essais de traçage *in situ* :

Des essais de traçage ont été effectués entre les forages 0689/2X/13 (504.40 m) et 0689/2X/14 (1003.15 m), distants de 10 m. Les traceurs, Rhodamine Wt et uranine ont été injectés à deux niveaux (305 et 360 m) dans le 1^{er} forage. Un gradient hydraulique de l'ordre de 4 a été maintenu entre les deux forages par pompage intermittent dans le forage 0689/2X/14 afin d'accélérer les transferts éventuels.

Aucune baisse de niveau dans le sondage 0689/2X/13 n'a été constatée à la suite des pompages. Aucun traceur n'a été décelé dans le forage 0689/2X/14 sur la période d'observation (3 mois environ), ce qui confirme qu'il n'y a pas de relation entre les deux forages.

1.3.3. - Autres études :

A la suite des premiers travaux du B.R.G.M. le granite d'Auriat a fait l'objet de nombreuses études à caractère fondamental. Nous faisons suivre la liste non exhaustive des thèmes de recherche ayant un rapport plus ou moins direct avec le granite d'Auriat, ainsi que celle des organismes concernés :

- Mise au point d'un modèle de transport (E.N.S.M.P.).
- Etude conjointe des transferts thermiques et des lixiviations (dissolution-reprécipitation) liés au dégagement énergétique des déchets (B.R.G.M.).
- Etude comparative de la fracturation profonde et de la fracturation superficielle (B.R.G.M.).
- Etude du colmatage des fissures en milieu granitique par précipitation de la silice (E.N.S.M.P. et B.R.G.M.).
- Etude statistique de la détermination des perméabilités d'un massif fissuré (E.N.S.M.P.).
- Détermination du comportement du granite sous pression à haute température (Ecole Polytechnique).
- Etude de la charge thermique admissible en formation géologique (I.P.S.N.).
- Etude des altérations hydrothermales des massifs granitiques (Université de Poitiers).

Tous ces travaux ont fait l'objet de communications lors de la "Journée sur le granite" (26 juin 1984, document B.R.G.M N°84).

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes particulièrement intéressés aux travaux de J.C.PARNEIX (1987) portant sur l'altération hydrothermale des granites ainsi qu'aux travaux menés par le Laboratoire de Mécanique des Solide (L.M.S) de l'Ecole Polytechnique, sur le comportement du granite sous pression à haute température.

Une partie des travaux de J.C.PARNEIX, a consisté à mener une étude pétrographique complète des altérations hydrothermales du granite d'Auriat. Cette recherche a été plus particulièrement orientée sur les altérations localisées au niveau des fractures. Le tableau 1.6 récapitule les principaux résultats relatifs à la nature des produits d'altérations en fonction des minéraux primaires et de la profondeur.

Enfin, le travail du L.M.S a porté sur le comportement du granite sain de texture G1 (échantillons prélevés entre 238.2 et 249.2 m). Ces données nous ont été particulièrement utiles dans le cadre de l'étude porosimétrique du granite d'Auriat.

- CHAPITRE 2 -

CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DU GRANITE D'AURIAT

2.1 - Introduction :

Dans un premier temps, nous établissons notre propre colonne pétrographique du forage 0689/2x/14 dans le granite d'Auriat. Nous observons plus spécialement l'évolution de la teinte plus ou moins rouge des feldspaths, qui constitue un critère de différenciation des faciès d'altération au niveau de la matrice garnitique.

Après avoir défini, un certain nombre de faciès, nous présentons une sélection de microphotographies en lumière polarisée (microscopie optique à transmission) et de clichés de MEB (microscopie électronique à balayage), les illustrant.

La caractérisation minéralogique du granite d'Auriat a permis d'identifier les argiles de remplissage des fractures sans apporter d'informations complémentaires au niveau de la matrice.

Enfin, nous caractérisons chimiquement le granite d'Auriat à l'échelle de la roche, puis à l'échelle du grain.

2.2. - Caractérisation à l'oeil nu et délimitation des principales zones d'altération :

2.2.1. - Présentation de l'étude :

Plusieurs colonnes pétrographiques du forage 0689/2x/14 dans le granite d'Auriat ont déjà été établies dans différentes optiques.

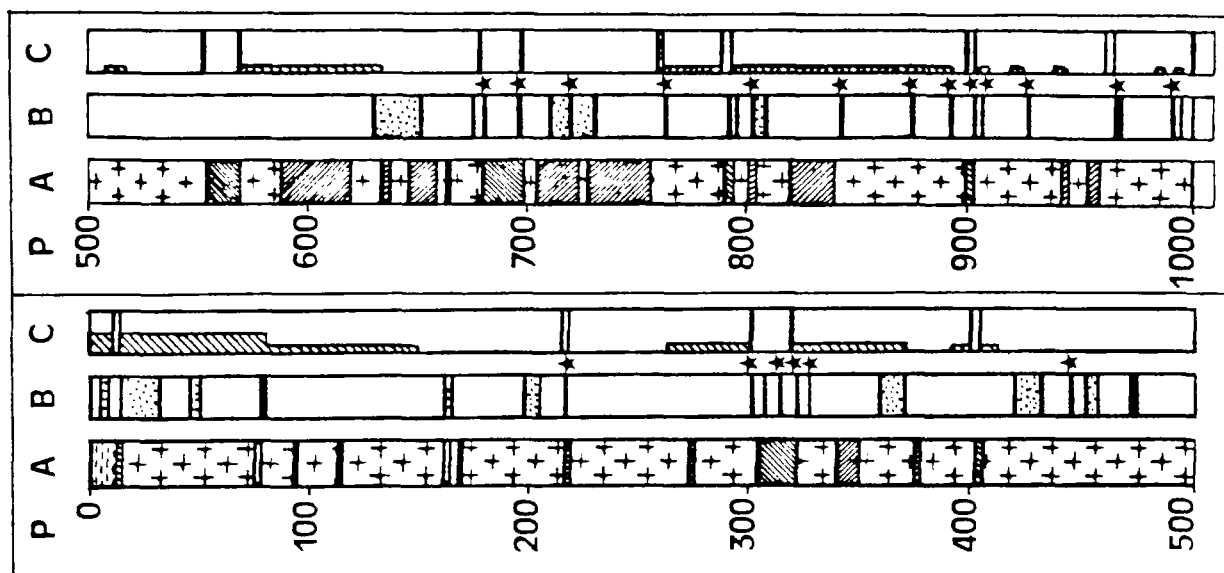
La première colonne pétrographique a été établie par le BRGM (1981) (cf.fig.2.1). Les géologues du BRGM ont répertorié les zones saines (en distinguant les textures G1 et G2), les zones cataclasées, et les zones altérées. Dans cette classification, la rubéfaction de la roche n'est pas un critère suffisant pour ranger celle-ci dans le faciès altéré. Seul le granite considéré comme de texture G1 ayant subi une altération météorique entre dans cette catégorie.

La seconde colonne pétrographique a été établie par J.C.PARNEIX (1987). Elle est plus particulièrement orientée sur la disposition des zones d'altération et la nature du remplissage des veines (cf.fig 2.2). En ce qui concerne l'altération dans la masse de la roche, il distingue le granite "sain" du granite "chloritisé".

2.2.2. - Délimitation des Zones d'altérations typiques :

Nous avons bâti une colonne pétrographique axée principalement sur les altérations affectant la matrice du granite (cf.fig.2.3.).

La couleur des minéraux est un paramètre prépondérant dans l'étude visuelle des altérations d'un granite. Nous avons dénombré les couleurs présentes le long du sondage et les avons codifiées. Pour ce faire, nous avons employé le nuancier 747XR seconde édition 1987-1988 Pantone (Copyright Pantone Inc.1963, 1987) contenant 773 couleurs imprimées sur papier glacé et sur papier mat. Un numéro de code est affecté à chaque couleur.



P = Profondeur (m).

A = Pétrographie :

Granite G1 altéré

G2 monzogranite plus ou moins porphyrique à fond microgrenu

G1 monzogranite porphyroïde à fond largement grenu présentant des passées de pegmatoïdes

Granite cataclasé (épaisseur supérieure à 1 m)

B = Fractures à pendage > 60° :

Zones très fracturées (+ de 30 fractures au mètre linéaire)

Grandes failles

Zones moins fracturées (- de 10 fractures au mètre linéaire)

C = Fractures à pendage < 30° :

Plus d'une fracture au mètre linéaire

moins d'une fracture au mètre linéaire

FIG.2.1 : Colonne pétrographique du granite d'Auriat - fracturation.
(d'après document B.R.G.M) 1980

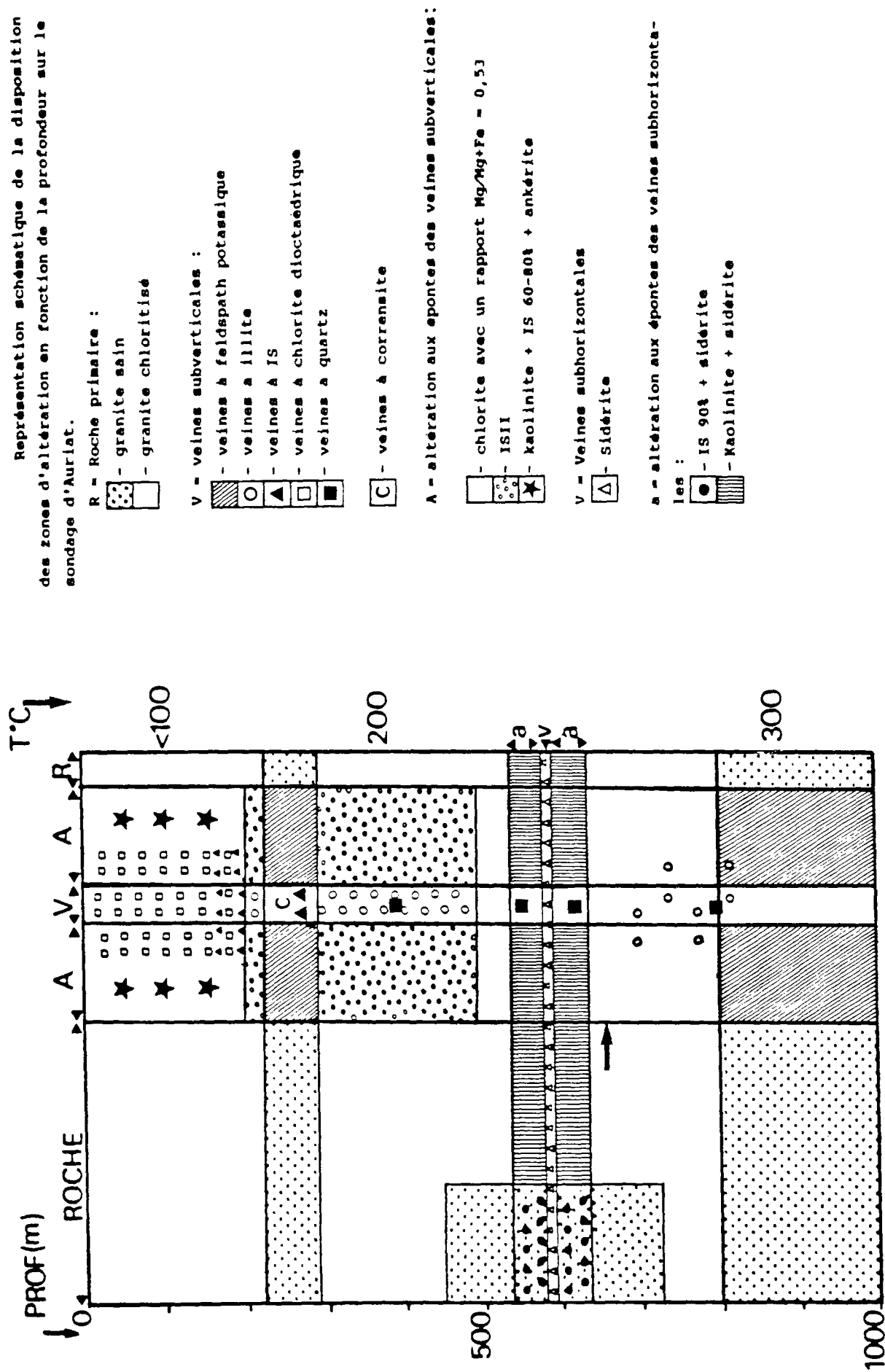
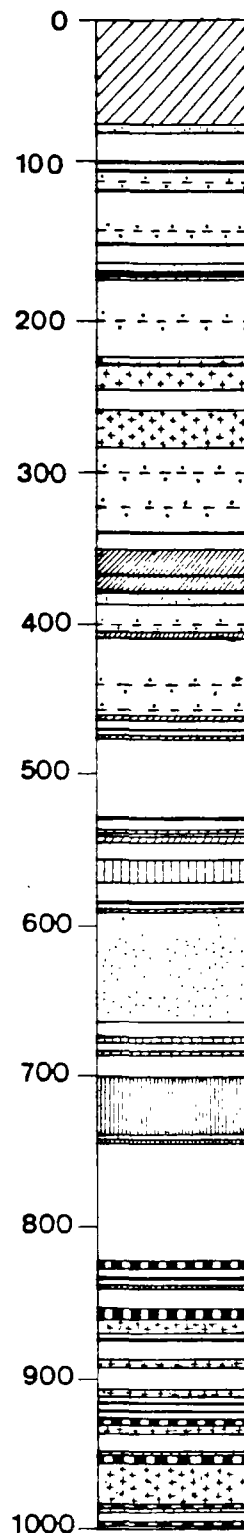


Fig. 2.2: Représentation schématique de la disposition des zones d'altération en fonction de la profondeur sur le sondage d'Auriat, d'après J.C PARNEIX (1987)

PROFONDEUR
(m)



- Granite sain G1
- Granite sain G2
- Microgranite gris
- Microgranite rose
- Mylonite
- Granite cataclaté rose
- Filon à biotites
- Granite rubéfié
- Feldspaths
"rouge sang"
- Argile verte

FIG. 2.3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES FACIES OBSERVES
SUR LE SONDAGE D'AURIAT

Les observations visuelles ayant été effectuées sur les carottes abondamment mouillées, nous avons comparé les couleurs des minéraux avec celles du nuancier dans sa version imprimée sur papier glacé.

Sur 140 échantillons représentatifs du sondage, nous avons testé 453 minéraux et reconnu 152 couleurs.

Pour plus de clarté, nous avons regroupé les couleurs dans un nombre limité de catégories désignées par un nom commun de couleur. Pour décrire la couleur d'un minéral, on utilisera un nom commun de couleur suivi du numéro de code du nuancier

Exemples : teinte chair 172, teinte chair 173, vert 454, vert 5783.

La convention des couleurs figure dans l'annexe 1.

La caractéristique visuelle du sondage est l'omniprésence de feldspaths rouges dont les nuances sont multiples et qui donnent une teinte rose au granite. Nous utiliserons l'adjectif "rubéfié" pour qualifier un minéral rouge, indépendamment de sa nature. La quasi-totalité des minéraux rubéfiés observés sont des feldspaths, surtout des plagioclases. Le terme "granite rubéfié" désignera un granite contenant des minéraux rubéfiés.

Le terme "rubéfaction" sera employé pour désigner le processus physico-chimique responsable de cette coloration des minéraux. L'objet de notre étude est d'étudier les différents effets de la rubéfaction sur le granite et ses minéraux constitutifs plutôt que ses causes.

Pour des raisons de volume, la description détaillée des altérations du granite d'Auriat figure dans l'annexe 1. Il en est de même pour la liste des échantillons.

Convention de notation : la référence des échantillons correspond à leur profondeur de prélèvement (cote inférieure). Ex : "Ech.12.00" désigne l'échantillon prélevé entre 12.00 et 12.15 m de profondeur.

En ce qui concerne la roche prise dans sa masse, il existe deux types principaux de faciès : le granite gris à l'aspect sain et le granite ayant probablement subi une altération hydrothermale se caractérisant par une rubéfaction de la roche. Ce dernier faciès est de loin le plus important. Les caractéristiques texturales et pétrophysiques permettront par la suite de définir des sous-catégories pour les faciès sains et rubéfiés. Le haut du sondage est caractérisé par une reprise des altérations de type hydrothermal par les eaux météoriques. On note également des passées cataclasées, rubéfiées ou non, ainsi que la présence de mylonites.

2.3. - Etude pétrographique des altérations du granite d'Auriat, au moyen du microscope optique à transmission et du microscope électronique à balayage :

2.3.1. - Introduction :

L'étude microscopique du granite d'Auriat a été effectuée en détail par le B.R.G.M (1981), puis par J.C.PARNEIX (1987). Dans le souci d'éviter toute redondance, nous ne ferons qu'un bref rappel sur la texture et la minéralogie du granite d'Auriat.

Nous avons sélectionné une série de clichés illustrant les différents faciès d'altération. Ayant constaté que les feldspaths potassiques étaient peu atteints par l'altération hydrothermale, nous avons plus particulièrement orienté notre étude sur les plagioclases.

Enfin, nous avons réalisé une investigation au microscope électronique, dont nous commenterons un choix de clichés.

ECHANTILLON 27.40

Cet échantillon a été prélevé à un niveau où les effets des altérations hydrothermales (milieu réducteur) et météorique (milieu oxydant) se conjuguent. Macroscopiquement, les plagioclases sont rubéfiés marron clair 4645, et les feldspaths potassiques rose orangé soutenu 1555. Communément, ce type de roche est appelée "roche pourrie"

LUMIERE "NATURELLE"	X 32	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 32
<p>On note la présence de nombreux minéraux opaques (oxydes) dans des zones assez nettement délimitées. Au centre de la photographie se trouvent des domaines rougeâtres sans minéraux opaques.</p>		<p>La texture est floue : les joints de grains ne sont pas visibles et il est difficile de caractériser les phases minérales en présence. Des plagioclases très altérés sont reconnaissables par leurs macles polysynthétiques.</p>	

ECHANTILLON 119.65

Cet échantillon appartient au faciès rubéfié (texture G1). Les plagioclases sont généralement rubéfiés. Le plagioclase étudié est macroscopiquement orange 157. Il est représentatif des plagioclases rubéfiés présents dans cette partie du sondage.

LUMIERE "NATURELLE"	X 25	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 25
<p>On remarque des zones rougeâtres nettement délimitées géométriquement et d'intensité de couleur variable. Elles sont reliées entre elles par un réseau de fissures rectilignes et rougeâtres. On note la présence de quelques minéraux opaques au niveau des zones les plus intensément rougeâtres.</p>		<p>L'examen en LPA montre que les zones colorées en LN correspondent au zonage de composition, mais aussi à l'altération d'un plagioclase. La périphérie albitique du plagioclase est intacte, alors que le coeur plus calcique est largement altéré : séricitisation + présence d'oxydes. On notera que la couleur rougeâtre caractéristique visible en LN, persiste en LPA, ce qui témoigne de l'intense rubéfaction du minéral. On remarque que le réseau de fissures et que certains clivages sont comblés par des produits d'altération rougeâtres.</p>	

27.40

X 52



CLICHE 1A

27.40

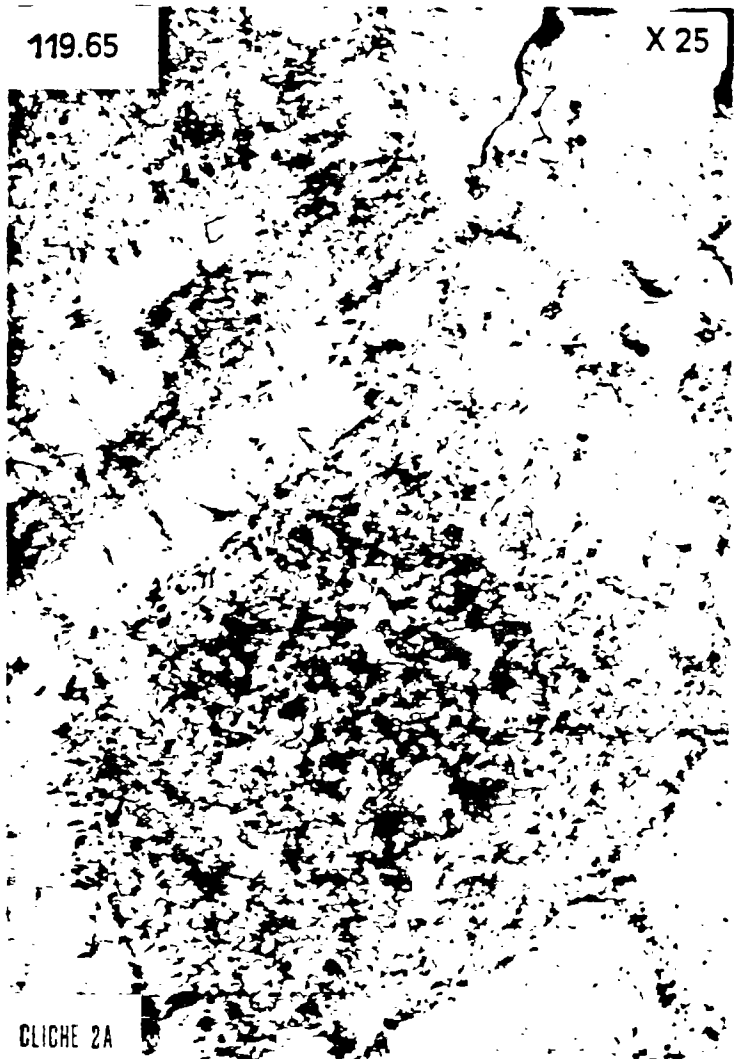
X 52



CLICHE 1B

119.65

X 25



CLICHE 2A

119.65

X 25



CLICHE 2B

ECHANTILLON 119.65			
<p>Cet échantillon appartient au faciès rubéfié (texture G1). La 2ème photographie relative à cet échantillon, représente une forte concentration de minéraux opaques au coeur d'un plagioclase. Ce type d'altération se matérialise sur l'échantillon par des points rouge vif 181, entourés d'un liséré blanc.</p>			
LUMIERE "NATURELLE"	X 25	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 25
<p>La photographie montre une forte concentration de minéraux opaques dans un domaine précisément délimité. Le fond est clair et très légèrement rougeâtre. On remarque la présence d'un mica dans le coin supérieur droit de la photographie.</p>		<p>Le cliché en LPA montre que le mica est une biotite très fortement décolorée. L'étude complète de la lame mince a permis de voir que la décoloration des biotites n'a lieu qu'à proximité des concentrations de minéraux opaques. On notera que ceux-ci s'orientent dans l'axe d'allongement de la biotite décolorée. La périphérie du plagioclase est claire et relativement peu altérée. Macroscopiquement, cette zone correspond au liséré blanc.</p>	

ECHANTILLON 262.63			
<p>Cet échantillon appartient au faciès de granite gris à l'aspect sain (G1). Macroscopiquement les plagioclases sont rose pâle 155 ou plus rarement rose orangé soutenu 1555. Les orthoses sont gris 429. La texture est largement grenue avec de grands plagioclases.</p>			
LUMIERE "NATURELLE"	X 16	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 16
<p>Les figures d'altération sont caractéristiques d'un plagioclase peu altéré. On remarque des zébrures limpides correspondant probablement à des antiperthites (inclusions pétrogénétiques d'orthose dans un plagioclase) A droite, on note la présence d'une biotite chloritisée.</p>		<p>L'examen de la prise de vue en LPA confirme les observations faites en LN sans apporter d'informations supplémentaires.</p>	

119.65

X 25



CLICHE 3A

119.65

X 25



CLICHE 3B

262.63

X 16



CLICHE 4A

262.63

X 16



CLICHE 4B

ECHANTILLON 682.55

Cet échantillon a été prélevé dans une zone affectée par une fracture importante (de 682.35 à 683.05), entièrement colmatée par un produit ayant des passées blanches et noires et ne réagissant pas à HCl 10⁻¹.
Aucune détermination minéralogique n'est possible à l'oeil nu.
Les clichés ci-contre illustrent l'excellent colmatage de la fracturation.

LUMIERE "NATURELLE"	X 10	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 10
<p>Le condensateur du microscope a été baissé afin d'accentuer l'effet de relief. Deux fractures sont visibles : 1) dans l'axe vertical de la photo. 2) dans le coin supérieur droit. La première a un remplissage carbonaté qui recoupe la seconde qui est limpide (quartz). La seconde fissure semble être une voie principale d'alimentation en fluide riche en silice. On distingue nettement des figures fluidales partant de cette fissure dans le quart supérieur gauche de la photographie.</p>		<p>L'examen en LPA permet d'observer la morphologie des grains de quartz qui comblent une bonne partie de la fissure de façon épitaxique. On note que la taille des grains de quartz augmente au fur et à mesure du remplissage. Il semble que la croissance des grains de quartz s'est arrêtée brutalement et que les vides restant ont été comblés par de la calcite.</p>	

ECHANTILLON 855.20

Cet échantillon appartient au faciès rubéfié (texture G2) le plus spectaculaire que l'on puisse rencontrer dans le sondage d'Auriat et que l'on trouve surtout à partir de 800m. Les plagioclases sont de couleur rouge 1675 et donnent un aspect sanglant à la roche.

LUMIERE "NATURELLE"	X 25	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 25
<p>On note la présence de grandes plages relativement homogènes marron et contenant par endroit des formes rectangulaires plus sombres (en particulier dans le quart inférieur droit de la photographie). Celles-ci peuvent être interprétées comme étant des fantômes de biotite. On notera également que les joints de grain sont soulignés par la présence de produits d'altération bruns.</p>		<p>L'examen en LPA confirme la rubéfaction particulièrement intense des plagioclases qui prédomine sur la teinte de polarisation. On remarque que certains grains de quartz ont une forme granulaire et sont entourés d'une frange brune quand ils ne sont pas noyés dans le plagioclase rubéfié.</p>	

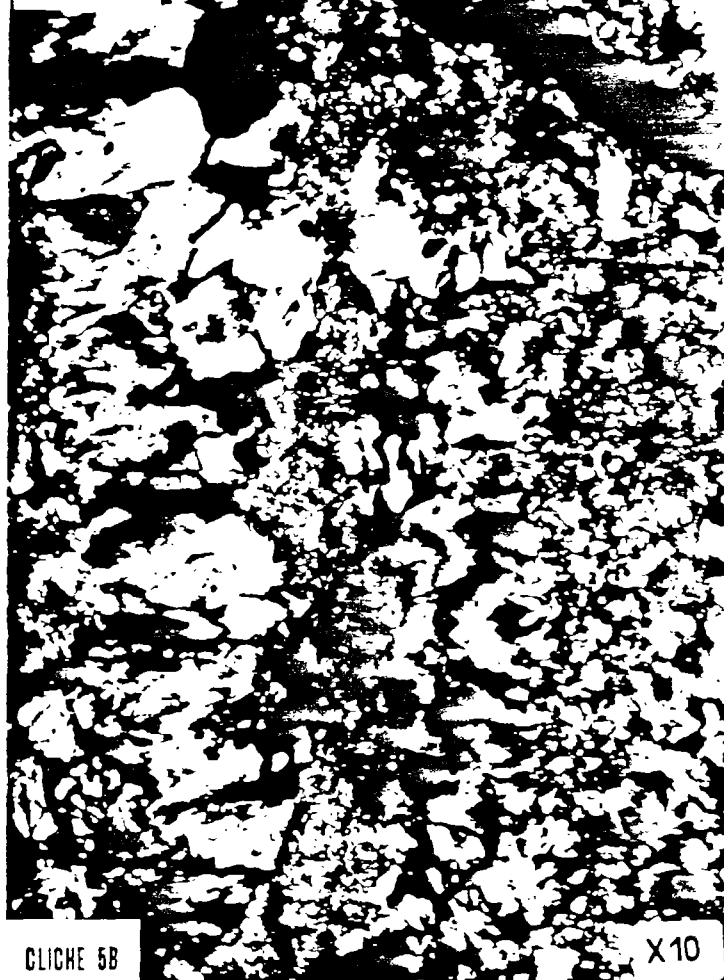
682.55



CLICHE 5A

X 10

682.55



CLICHE 5B

X 10

855.20



X 25

CLICHE 6A

855.20



X 25

CLICHE 6B

ECHANTILLON 866.00			
Cet échantillon appartient au faciès de granite gris à l'aspect sain (G2). Cependant, on remarque la présence disséminée de quelques plagioclases marron clair 4685.			
LUMIERE "NATURELLE"	X 25	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 25
Le plagioclase est très légèrement altéré dans son coeur. La périphérie du minéral est globalement limpide. La bordure droite du plagioclase est soulignée par une frise d'altération reliant les deux biotites de droite avec le coeur du plagioclase.		L'examen en LPA montre que les produits d'altération se concentrent dans les zones du plagioclase où la teinte de polarisation est gris foncé. Le système de fissuration où ont diffusé les fluides hydrothermaux est masqué par les teintes de polarisation des minéraux.	
ECHANTILLON 932.85			
Cet échantillon est rubéfié mais appartient à une passée de granite globalement sain. L'échantillon a été prélevé à 10 cm d'une fissure de 60° de pendage, remplie de biotites. A ce niveau du sondage, les plagioclases sont rose pâle 162 et marron clair 4645.			
LUMIERE "NATURELLE"	X 10	LUMIERE POLARISEE ANALYSEE	X 10
De grandes plages brunes homogènes se détachent sur un fond relativement limpide (quartz). On remarque dans le quart inférieur droit de la photographie, la présence de chlorites vertes contenant des concentrations d'oxyde de fer au niveau des clivages. L'altération des chlorites semble être liée à celle des plagioclases. En effet, on retrouve les mêmes minéraux opaques dans les chlorites et les plagioclases. L'aspect des plagioclases rubéfiés des échantillons 855.20 et 932.85 est identique en LN.		L'examen en LPA permet d'observer une déformation mécanique du plagioclase se trouvant au centre de la photographie.	

866.00



CLICHE 7A

X 25

866.00



CLICHE 7B

X 25

932.85



X 10

CLICHE 8A

932.85



X 10

CLICHE 8B

ECHANTILLON 34.20	X 300	ECHANTILLON 153.35	X 1000
<p>Granite rubéfié - Texture G1 - Echantillon rubéfié ayant subi une altération de type météorique.</p> <p>Ce cliché pris à faible grossissement met en évidence la forte déstabilisation des feldspaths. On remarque de nombreux décollements au niveau des plans de clivage ainsi que l'omniprésence des particules d'argile de type illite.</p> <p><i>Rayons d'accès des pores :</i></p> <p>Jusqu'à 15 µm</p>		<p>Granite rubéfié - Texture G1 - Echantillon macroscopiquement fissuré (marbrures millimétriques brunes) Prélèvement près d'une fissure d'un plagioclase rose pâle orange 148.</p> <p>Vue d'un plagioclase très altéré. On note la présence de nombreux pores circulaires dont le rayon d'accès moyen est 1 µm. Des plaquettes de plagioclase se débitent suivant les plans de clivage. Les particules d'argile sont omniprésentes et croissent à partir des plans de clivage du plagioclase. Nature probable des argiles : illite</p>	
ECHANTILLON 153.35	X 450	ECHANTILLON 153.35	X 7000
<p>Granite rubéfié - Texture G1 - Echantillon macroscopiquement fissuré (marbrures millimétriques brunes) Prélèvement près d'une fissure d'un plagioclase rose pâle orange 148.</p> <p>On reconnaît sur la surface au 1^{er} plan les traces régulières des clivages. La bande plus sombre correspond à une macle polysynthétique. On notera qu'à l'arrière plan, la surface du minéral est recouverte de squames. Ces figures d'altération sont symptomatiques de la présence d'oxydes ou d'hydroxydes. Les particules blanches se trouvant sur la surface du premier plan évoquent des particules d'illite.</p> <p><i>Rayon d'accès des pores :</i></p> <p>0.15 à 3.5 µm</p>		<p>Granite rubéfié - Texture G1 - Echantillon macroscopiquement fissuré (marbrures millimétriques brunes) Prélèvement près d'une fissure d'un plagioclase rose pâle orange 148.</p> <p>Cette prise de vue représente le grossissement d'un pore se trouvant sur un plagioclase (grossissement du cercle sur le cliché N°9) Son rayon d'accès extérieur maximum est de 7 µm et son rayon intérieur visible de 2 µm. Une partie du pore est comblée par des particules argileuses. On remarque les traces de clivage d'où émergent par endroit des plaquettes argileuses (illite).</p>	

34.20



153.35



0 100 μ

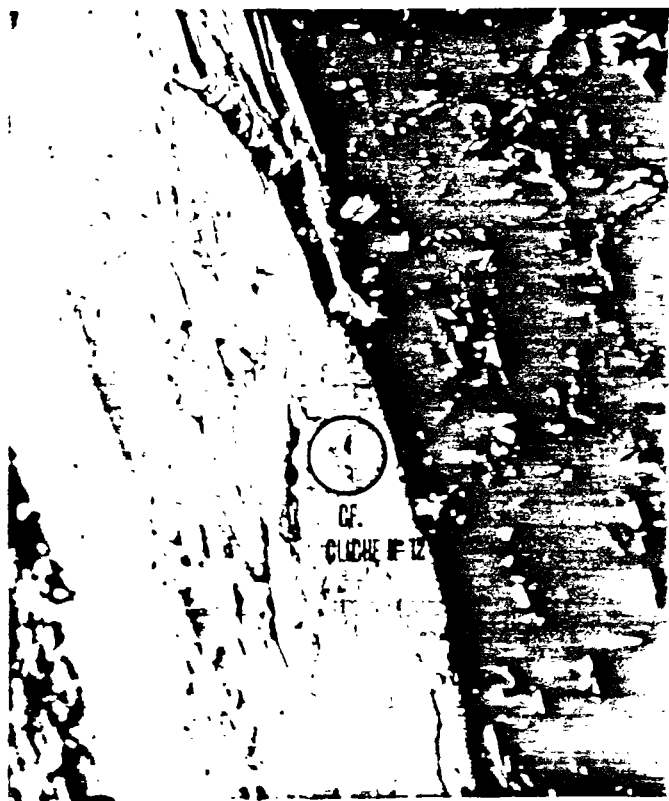
CLICHE N° 9

0 30 μ

CLICHE N° 10

153.35

153.35



0 100 μ

CLICHE N° 11

0 5 μ

CLICHE N° 12

ECHANTILLON 699.12	X 3000	ECHANTILLON 699.12	X 2000
Mylonite de couleur sombre Bien qu'aucun minéral ne soit reconnaissable à l'oeil nu, les statifications massives que l'on observe sur le cliché évoquent un feldspath. L'absence de pores est remarquable. Les éventuels espaces libres semblent colmatés, voire cimentés.		Mylonite de couleur sombre Le cliché met en évidence une fissure dans un minéral ayant l'allure d'un feldspath. La fissure semble parfaitement cimentée. La porosité de pores est inexistante et on note l'absence des particules argileuses.	
ECHANTILLON 854.63	X 200	ECHANTILLON 854.63	X 3000
Mylonite rouge Vue d'une mylonite fissurée et rubéfiée. La texture est très tourmentée et hétérogène. Il est difficile de reconnaître la nature minéralogique des différents constituants. La zone claire à droite du cliché semble être une éponte de fissure. De nombreux pores sont visibles. <i>Rayons d'accès des pores :</i> 1.25 à 5 µm		Mylonite rouge Vue d'une surface libre, probablement d'une éponte de fissure. On remarque de nombreux pores de forme arrondie. Certains d'entre-eux sont occlus. Deux interprétations contradictoires sont possibles : 1) il s'agirait de golfes de corrosion plus ou moins profonds. 2) il s'agirait de pores débouchant dans une fissure. Les pores qui ont les plus petits rayons d'accès seraient colmatés à la suite d'un processus de précipitation due à la rencontre des fluides circulant dans les pores et dans la fissure et qui n'auraient pas les mêmes caractéristiques physico-chimiques. Enfin, on remarque des formes ressemblant à des dunes triangulaires évoquant des flute-casts et semblant se développer à partir des pores. <i>Rayons d'accès des pores :</i> <i>pores bouchés :</i> 0.17 à 0.85 µm <i>pores libres :</i> 0.34 à 1.70 µm	

699.12

0 10 μ

CLICHE N° 13

699.12

0 10 μ

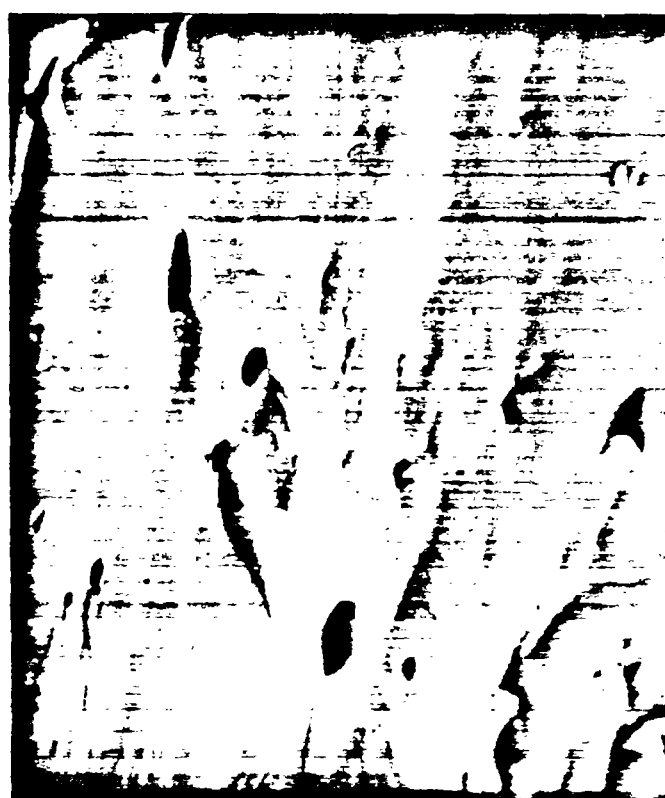
CLICHE N° 14

854.63

0 100 μ

CLICHE N° 15

854.63

0 10 μ

CLICHE N° 16

ECHANTILLON 966.40	X 4500	ECHANTILLON 966.40	X 2000
<p>Granite gris sain - Texture G1 -</p> <p>Le plagioclase photographié présente des macles polysynthétiques parfaitement nettes.</p> <p>On notera l'extrême propreté de la surface du minéral. Aucune trace d'altération chimique n'est visible.</p>		<p>Granite gris sain - Texture G1 -</p> <p>Vue d'un plagioclase.</p> <p>Le minéral est "propre" mais présente quelques golfes de corrosion anguleux, orientés suivant les clivages.</p> <p><i>Rayons d'accès des pores :</i> 0.13 à 1.6 µm</p>	
ECHANTILLON 981.60	X 450	ECHANTILLON 981.60	X 3000
<p>Granite rubéfié - Texture G2 -</p> <p>Prélèvement à 1 cm d'une fissure affectant une passée de granite sain.</p> <p>Vue générale sur des feuillets mica-cés (biotite plus ou moins chloritisée). Nous pouvons distinguer un amas de particules argileuses (illite) coincé entre les feuillets du mica.</p> <p>On remarque un minéral à l'aspect grêlé dans la partie supérieure de la photographie (probablement du quartz)</p> <p><i>Rayons d'accès des pores :</i> 0.15 à 1 µm</p> <p><i>Epaisseur maximale de la fissure :</i> 5 µm</p>		<p>Granite rubéfié - Texture G2 -</p> <p>Prélèvement à 1 cm d'une fissure affectant une passée de granite sain.</p> <p>Détail d'une fissure affectant un plagioclase très rubéfié.</p> <p>On note l'omniprésence de squames sur la surface de l'échantillon. Ces figures d'altération sont souvent attribuées aux oxydes.</p> <p>De nombreux accès de pores de forme pseudo-rectangulaire sont visibles.</p> <p><i>Rayons d'accès des pores :</i> 0.6 à 12 µm</p> <p>A partir des agrandissements que nous avons effectués à l'intérieur des pores, aucune présence de particules argileuses n'a été décelée.</p>	

966.40

966.40

0 5 μ

CLICHE N° 17

0 10 μ

CLICHE N° 18

981.60

981.60

0 50 μ

CLICHE N° 19

0 10 μ

CLICHE N° 20

2.3.2. - Texture et minéralogie du Granite d'Auriat :

L'étude au microscope optique à transmission montre deux faciès différents, qui ont été décrits et nommés par les pétrologues du B.R.G.M (1981) :

- G1 : monzogranite porphyroïde à fond largement hypidiomorphe (texture marquée par l'automorphisme du plagioclase et de la biotite).

- G2 : monzogranite porphyroïde ou non à fond microgrenu panxénomorphe avec des enclaves sombres.

Les deux faciès de monzogranite varient plus par leurs caractères texturaux que par leur minéralogie. Dans les deux cas, on observe la présence de phénocristaux de feldspaths potassiques zonés à inclusions de plagioclases et biotites, grands cristaux de biotite brun-rouge et de plagioclases zonés (An 30 - An 10). Ils diffèrent par l'habitus du quartz (xénomorphe dans G1, subautomorphe dans G2) et par la fréquence de cordièrite dans G2. Le faciès G1 présente localement des passées pegmatoïdes à minéralogie de type deutérique (albite, chlorite, carbonates, tourmaline et muscovite).

2.3.3. - Illustration des altérations du granite d'Auriat à partir d'une sélection de prises de vue réalisées au microscope optique :

Nous avons réalisé 86 lames minces correspondant à 79 profondeurs différentes. La liste des lames minces disponibles est répertoriée dans l'annexe 2. Nous avons fait figurer dans les pages qui précèdent une série de clichés en couleur représentant les figures d'altération qui nous semblaient les plus caractéristiques. L'étude a été axée plus particulièrement sur les altérations affectant les plagioclases.

2.3.4. - Illustration des altérations du granite d'Auriat à partir d'une sélection de prises de vue réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) :

Le MEB permet d'atteindre des grossissements très supérieurs à ceux obtenus avec la microscopie optique traditionnelle, et d'avoir des images tenant compte du relief de la surface observée : images nettes jusqu'à X 30000, de plus en plus floues jusqu'à X 100000 suivant la nature du matériau étudié, de son état de surface et de la qualité de la métallisation.

Ce moyen d'observation permet de visualiser les produits de très petite taille tels que les argiles. D'autre part, le MEB permet d'évaluer le rayon d'accès aux pores et donc de vérifier en partie la validité des spectres porosimétriques (cf. Chap.5).

Une compilation de clichés représentatifs des principales zones d'altération, est proposée dans les pages précédentes.

2.3.5. - Synthèse des observations aux microscopes optique et électronique :

La rubéfaction qui caractérise la matrice du granite d'Auriat affecte principalement les plagioclases. Elle est quelque fois si intense qu'elle apparaît non seulement en lumière "naturelle" mais encore en lumière polarisée et analysée, où elle prédomine sur la teinte de polarisation. L'observation des lames minces en lumière naturelle a permis de mettre en évidence le rôle important que jouent les joints de grains dans le processus de diffusion dans la masse du fluide hydrothermal éventuel. Dans de nombreux cas, la présence des plagioclases rubéfiés est associée à celle de biotites ou chlorites plus ou moins décolorées.

Enfin, on notera que la rubéfaction particulièrement intense que nous avons remarquée à l'échelle macroscopique au coeur de certains plagioclases, se matérialise à l'échelle microscopique par de fortes concentrations de minéraux opaques.

Les microphotographies prises au MEB permettent de visualiser les produits argileux ainsi que de mesurer les rayons d'accès des pores à partir de 0.1 μm . Par la suite, la comparaison de ces données avec celles issues des études de la porosité, de la porosimétrie et de la perméabilité devrait déboucher sur une meilleure connaissance de l'espace poreux du granite d'Auriat en relation avec son type d'altération.

2.4. - Etude minéralogique des altérations du granite d'Auriat au moyen de la diffraction des rayons X :

2.4.1. - Sélection et préparation des échantillons - dispositif expérimental :

Nous avons réalisé tous les diffractogrammes à partir d'une source de rayons X délivrée par un tube à anticathode de cuivre (diffractomètre Siemens D401). Un filtre Ni permet d'éliminer physiquement le rayonnement $K\beta$ alors que les effets parasites de la raie $K\alpha_2$ sont éliminés par traitement numérique (logiciel DIFFRAC-AT, développé et distribué par la SOCABIM). En fin de compte tout se passe comme si l'on diffractait avec un rayonnement X monochromatique de longueur d'onde : $K\alpha_1 = 1.5405 \text{ \AA}$

Nous avons effectué deux types de préparation :

- lames de poudre : la roche est réduite en une fine poudre. Statistiquement, les particules s'orientent de manière aléatoire sur la lame.
- lames orientées : La détermination des minéraux argileux est basée sur la connaissance de la distance réticulaire des plans (001) et de leurs harmoniques (002), (003) etc.

Afin de privilégier ces familles de plans réticulaires, nous avons adopté le mode opératoire suivant :

- Extraction de la fraction inférieure à 2 μm par la méthode d'Andreasen mod. Rivièrè.
- Sédimentation sur lame de verre non dépolie. Caractéristique : lors du séchage des lames, il se produit une sédimentation différentielle. A l'analyse, les plus fines particules fourniront l'essentiel de l'information, ce qui favorise les argiles.

Pour chaque échantillon, nous avons confectionné 2 lames :

- la première est étudiée sans traitement, puis après un passage pendant 4 heures au four à 490°C
- la seconde est étudiée après glycolage.

2.4.2. - Résultats :

Un grand nombre de diffractogrammes de poudres a été réalisé. Par ce moyen, nous espérons pouvoir discriminer les plagioclases "sains" des "rubéfiés". Malheureusement, aucune corrélation valable n'a pu être établie entre l'altération hydrothermale des feldspaths et la position de leurs pics de diffraction.

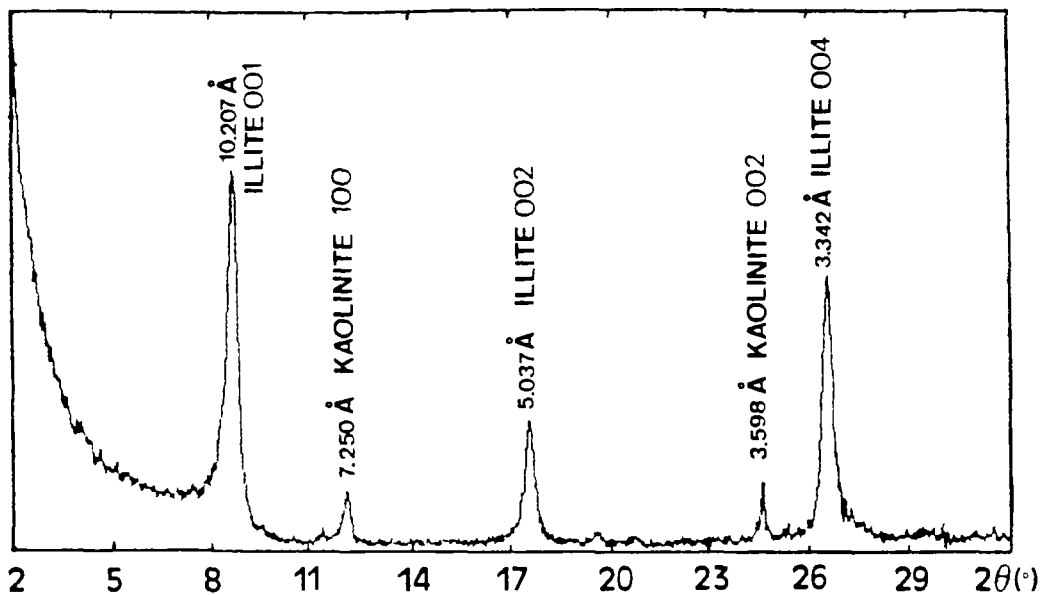


FIG. 2.4

ECHANTILLON 450.40 - PRODUIT DE
REMPLISSAGE DE FRACTURE DE PEN.
DAGE > 60° - FRACTION < 2 μ
DIFFRACTOMETRIE DE RX SUR PATE
ORIENTEE

LAME NON TRAITEE

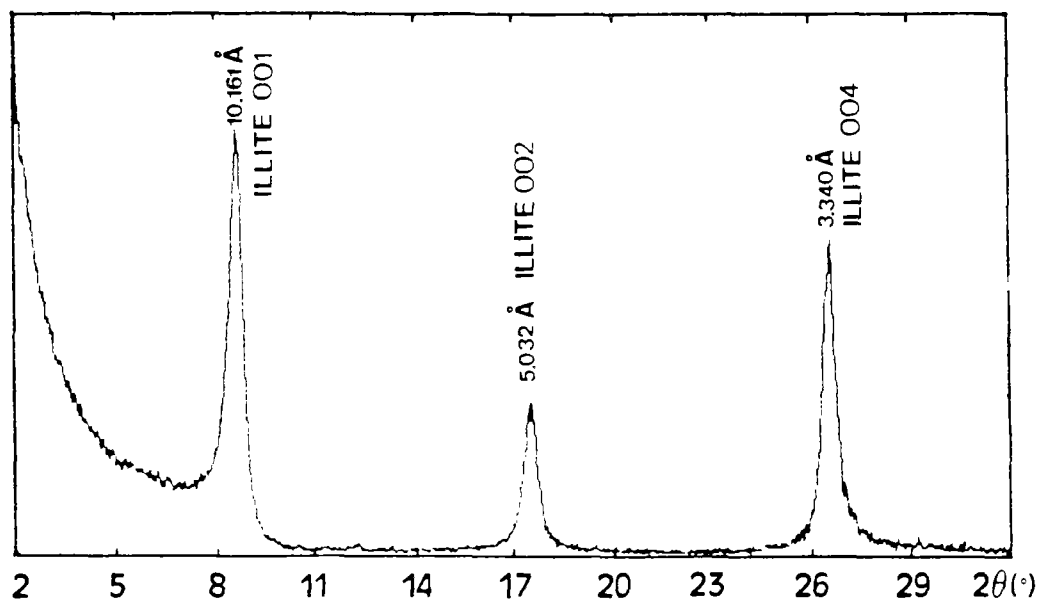


FIG. 2.5

MEME PRODUIT QUE CI-DESSUS

LAME CHAUFFEE

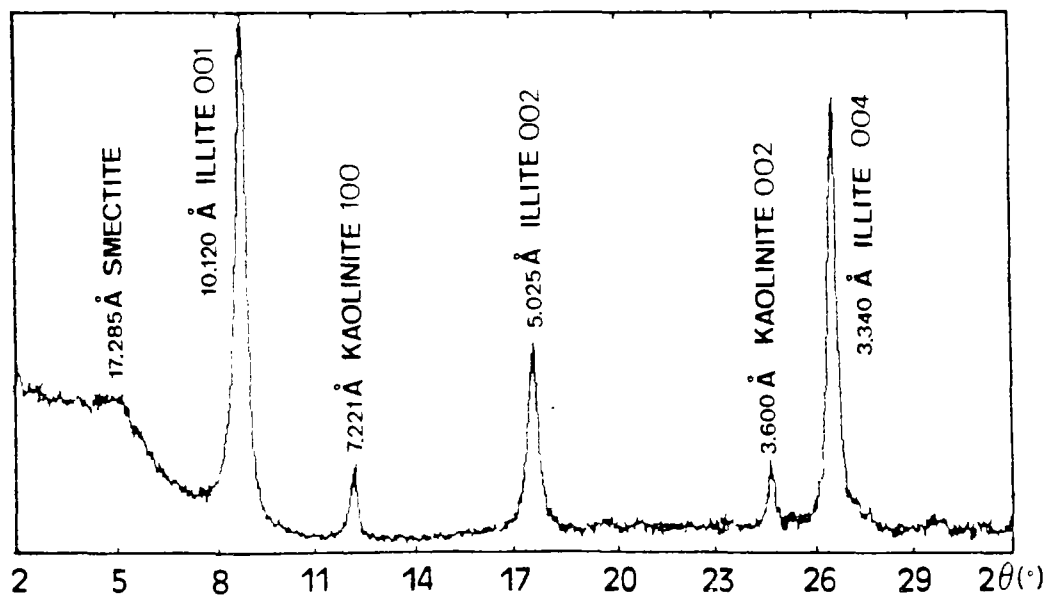


FIG. 2.6

MEME PRODUIT QUE CI-DESSUS

LAME GLYCOLEE

Prof. (m) *		Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite	Aspect de la roche
27.40	M	***	—	—	***	G.rubéfié alt.météo
196.45	F	***	—	*	**	Remplissage verdâtre
375.52	M	***	*	—	—	G.rubéfié
	F	***	—	*	**	Remplissage verdâtre
440.60	F	***	—	—	—	Remplissage verdâtre
450.40	F	***	—	**	**	Remplissage verdâtre
535.29	M	—	—	—	—	G.rubéfié
699.12	M	—	*	—	—	Mylonite sombre
854.63	M	—	—	—	—	Mylonite rouge
855.29	M	—	*	—	*	Granite très rubéfié
990.63	M	—	—	—	—	Enclave biotitique

Tableau 2.1 : Résultats des diffractogrammes réalisés sur lames orientées (fraction > 2 μ m).

Notes :

*** : abondant

** : peu abondant

* : traces

* : M ---> matrice. F ---> remplissage de fracture

Les diffractogrammes réalisés sur des lames orientées nous montrent que l'illite est le produit d'altération argileux dominant au niveau de la fracturation (cf. tableau 2.1). Dans la masse de la roche, mis à part les échantillons ayant subi une altération météorique intense et qui contiennent illite et smectite, la chlorite est souvent présente.

Les figures 2.4, 2.5 et 2.6 représentent les diffractogrammes réalisés sur la fraction inférieure à 2 μ m de l'échantillon 450.40 (remplissage de fracture subverticale - produit verdâtre), où apparaissent illite, kaolinite et smectite.

2.5 - Etude chimique des altérations du granite d'Auriat :

2.5.1. - Etude à l'échelle de la roche :

2.5.1.1. - Etude des analyses chimiques globales réalisées par fluorescence X et spectrophotométrie de flamme :

2.5.1.1.1. - Dispositifs expérimentaux :

2.5.1.1.1.1. - Analyses par fluorescence X :

Pour l'aluminium, la silice, le potassium, le calcium, le titane et le fer, les analyses chimiques ont été réalisées avec l'appareillage CGR ALPHA 10.

Les analyses sont réalisées sur perles, dont nous rappelons les principales étapes de fabrication :

1) Mise en poudre de 20 g de granite dans un broyeur à cylindres.

2) Mise à l'étuve à 105°C de la poudre jusqu'à poids constant puis détermination de la perte au feu après passage pendant 5 heures au four électrique à 1100°C, d'au moins 4 g de matériau.

3) Le matériau fondu est broyé puis remis à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant. Dans un creuset en platine, on mélange 0.8 g de matériau avec 9.2 g de fondant : 90% de tétraborate de lithium + 10% d'oxyde de lanthane (alourdisseur). On place le tout dans un four électrique à 1100°C puis on coule la matière fondue dans un moule en platine.

4) Les perles obtenues sont stockées dans un dessiccateur.

2.5.1.1.1.2. - Analyses par spectrophotométrie de flamme :

Le sodium et le magnésium ont été dosés avec un spectrophotomètre de flamme BECKMAN 495. La mise en oeuvre de l'essai est relativement simple mais la préparation des échantillons est longue et très délicate. En effet, cette méthode de dosage exige la mise en solution du matériau à analyser. Nous avons adopté la méthode d'attaque par voie humide de type sulfofluorhydrique, décrite et mise au point par I.A.VOINOVITCH (1962) et que nous avons adaptée pour travailler en série.

Le magnésium a été dosé par absorption de flamme et le sodium par émission de flamme.

2.5.1.1.2. - Présentation et analyse des résultats :

Le premier examen du tableau 2.2 regroupant la totalité des analyses des éléments majeurs, montre que pour certaines passées, leur somme plus la perte au feu (Pf) est souvent supérieure à 100 %. Nous attribuons cette anomalie aux incertitudes de mesure plutôt qu'à la présence très improbable d'une forte teneur en fluor dans ces zones.

L'étude des éléments majeurs montre une relative homogénéité des compositions du granite. Les teneurs en K₂O semblent varier en fonction de la quantité de microcline présente dans la roche.

Les taux de magnésium et de calcium de l'échantillon 513.70 sont sensiblement plus élevés et témoignent de la présence d'une microfissuration à remplissage dolomitique.

L'échantillon 990.63 présente un taux très élevé en alumine (70.73 %) et très faible en silice (5.43 %). Cet échantillon a été prélevé dans une enclave sombre très riche en biotite. Le diffractogramme de rayons X présente les pics de l'albite, de la biotite et du quartz mais pas ceux de produits très riches en aluminium. Bien que cet échantillon soit effectivement très riche en aluminium, il est possible que les dosages de la silice et de l'aluminium aient été perturbés par un effet inter-éléments.

Prof. (m)	Na ₂ O (%)	MnO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	FeO (%)	Pf (%)	Total (%)
12.00	2.05	1.41	14.30	70.99	4.18	1.04	0.36	1.63	1.30	97.26
15.25	1.25	0.68	13.29	70.78	6.92	0.42	0.23	1.79	1.95	97.31
17.30	2.54	0.75	13.68	74.98	5.31	0.34	0.24	0.82	1.45	100.11
20.80	3.10	0.96	14.52	73.08	4.85	0.50	0.19	1.10	1.10	99.40
27.40*	1.75	0.93	13.34	74.50	5.64	0.49	0.24	0.96	1.89	99.74
**	1.78	1.08	13.46	74.47	5.64	0.51	0.24	1.07	1.73	99.98
34.20	3.88	1.49	14.90	70.11	5.79	0.78	0.22	1.25	1.45	99.87
41.90	2.79	1.20	14.21	71.25	4.22	1.16	0.30	1.56	1.22	97.91
105.10	3.09	1.00	14.91	71.46	4.83	1.06	0.23	1.15	0.92	98.65
217.20	2.95	0.94	14.94	72.88	5.85	0.40	0.26	1.13	2.00	101.35
220.80	3.75	0.80	14.72	72.44	5.80	0.85	0.26	1.33	1.18	101.13
237.30	3.91	1.40	14.31	73.12	4.68	0.91	0.20	1.25	0.91	100.69
262.63	3.52	2.32	13.31	73.47	4.12	0.65	0.37	1.92	1.48	101.16
272.50	3.47	1.53	13.35	75.19	4.99	0.76	0.23	1.41	0.90	101.83
301.80	4.81	1.09	14.54	72.47	5.57	0.62	0.28	1.42	1.67	102.47
324.05	2.73	0.96	13.64	75.66	5.23	0.39	0.22	1.17	1.63	101.63
375.52*	2.54	2.10	15.12	72.10	5.43	0.55	0.24	1.45	1.53	101.06
**	1.00	1.17	23.58	55.57	9.92	1.73	0.35	1.14	4.66	99.12
391.53	2.41	0.87	14.17	73.18	5.45	0.53	0.21	1.35	1.38	98.35
402.80	2.31	1.54	14.03	72.82	4.65	0.82	0.22	1.28	1.87	97.67
440.60*	2.73	1.41	14.56	78.26	4.88	—	0.06	0.80	0.21	102.91
**	—	2.55	14.21	71.43	5.58	1.08	0.20	1.34	2.79	99.18
450.40*	4.13	0.92	14.13	74.84	5.24	0.25	0.11	1.05	2.26	102.93
**	1.25	0.66	19.41	67.17	7.31	0.29	0.26	0.82	2.86	100.03
469.20	2.98	0.98	14.86	72.11	6.38	0.40	0.21	1.24	1.23	100.39
489.48	2.78	1.14	14.10	71.12	6.24	1.11	0.12	0.97	2.17	99.75
513.70	4.83	3.76	16.30	57.56	6.45	3.42	0.24	1.41	6.58	100.55
513.88	4.07	0.90	13.54	73.63	4.96	0.64	0.23	1.28	2.27	101.52
524.10	1.70	0.62	11.50	78.85	4.25	0.50	0.19	0.73	1.46	99.80
673.54	4.25	1.08	13.15	73.54	4.48	0.50	0.26	1.43	1.31	100.00
682.20	3.97	0.48	15.14	72.10	9.43	0.14	0.04	0.55	0.71	102.56
699.12	2.10	1.73	13.57	72.41	4.38	1.43	0.28	1.52	1.10	98.53
730.30	3.47	1.30	15.25	69.77	6.10	0.71	0.29	1.58	1.68	100.15
749.50	2.07	0.91	14.62	71.72	6.41	0.78	0.20	1.14	1.25	99.10
758.73	2.67	1.32	13.47	67.07	5.92	0.73	0.18	0.94	8.14	100.44
770.50	2.38	1.97	13.96	69.49	5.26	1.39	0.27	1.72	3.00	99.44
784.20	2.99	1.61	13.64	68.81	5.09	1.96	0.25	1.46	3.89	99.70
825.84	2.64	1.55	14.35	71.15	6.39	0.80	0.29	1.83	1.71	100.73
854.63	2.71	1.09	13.48	73.98	5.83	0.49	0.11	0.64	1.03	99.36
855.20	2.62	1.59	14.65	70.63	6.18	0.52	0.28	1.56	1.35	99.38
866.00	2.30	1.57	14.47	71.55	5.15	1.28	0.30	1.73	0.89	99.29
886.03	2.63	1.64	14.85	70.38	5.15	1.43	0.31	1.74	1.27	99.40
932.85	3.96	1.49	14.46	69.81	5.10	1.16	0.28	1.34	1.48	99.08
966.40	3.28	2.81	15.19	68.98	5.60	1.28	0.30	1.71	1.14	100.29
976.60	3.72	1.09	15.23	68.72	5.65	1.15	0.31	1.40	1.34	98.61
981.60	3.83	1.65	14.61	69.69	5.53	1.34	0.29	1.51	1.31	99.76
990.63	3.77	3.83	70.73	5.43	3.77	2.74	0.97	4.87	1.49	97.60

Tableau 2.2 : Analyses chimiques globales des éléments majeurs constitutifs du granite d'Auriat (en pourcentages pondéraux).

Notes : Tous les éléments ont été analysés par fluorescence X à l'exception du sodium et du magnésium analysés respectivement par émission et absorption atomique. * et ** correspondent respectivement pour une même profondeur, aux analyses effectuées sur un prélèvement fait dans la masse et dans une fissure.

Les caractères en gras signalent les échantillons sains et les caractères soulignés les échantillons cataclasés ou mylonites.

2.5.2. - Etude à l'échelle du minéral : analyses chimiques au moyen de la microsonde électronique :

2.5.2.1. - But de l'étude :

Les analyses à la microsonde ont été effectuées au Centre de Géologie Générale et Minière de l'Ecole des Mines.

Limités par le temps, nous avons étudié seulement 4 échantillons (sous forme de surfaces polies à 0.25 µm), et effectué 37 points de mesure au total. L'objectif que nous nous sommes fixé est le suivant : tenter de déterminer la nature de l'élément responsable de la rubéfaction des feldspaths et en particulier des plagioclases.

Les caractéristiques des faciès d'altération des échantillons étudiés sont regroupées dans le tableau 2.3.

Prof.(m)	ASPECT DE LA ROCHE
12.00	Granite rubéfié ayant subi une altération météorique
272.50	Granite gris à l'aspect sain
301.80	Granite rubéfié, plagioclases souvent orangés et entourés d'un liséré blanc
825.84	Granite rubéfié, plagioclases rouges

Tableau 2.3 : caractéristiques des échantillons analysés à la microsonde.

2.5.2.1. - Résultats et interprétation :

2.5.2.1.1. - Résultats bruts :

Nous avons regroupé la totalité des analyses dans les tableaux 2.4.a, b, c et d. Les fig. 2.7 à 2.16 représentent la position des points de mesure sur les minéraux étudiés. Il est difficile de tirer des conclusions définitives sur si peu de mesures. On remarquera cependant que la composition du mica (point 22 - tableau 2.4.d) est fondamentalement différente de celle des micas rencontrés dans les autres faciès : son taux en fer est environ 5.5 fois plus faible que la valeur moyenne mesurée par ailleurs. Cet appauvrissement correspondrait éventuellement à un enrichissement en fer des plagioclases. Les observations au MEB de plaquettes caractéristiques d'oxydes (ou hydroxydes), ainsi que celles faites au microscope optique de minéraux opaques appuient cette hypothèse.

Signification des figurés employés dans les tableaux 2.4.a, b, c et d		
Caractères gras	—>	plagioclase
<i>Caractères italiques & gras</i>	—>	feldspath potassique
<u>Caractères gras & soulignés</u>	—>	quartz
<i>Caractères italiques</i>	—>	mica (biotite)
<u>Caractères soulignés</u>	—>	chlorite
Caractères normaux	—>	calcite

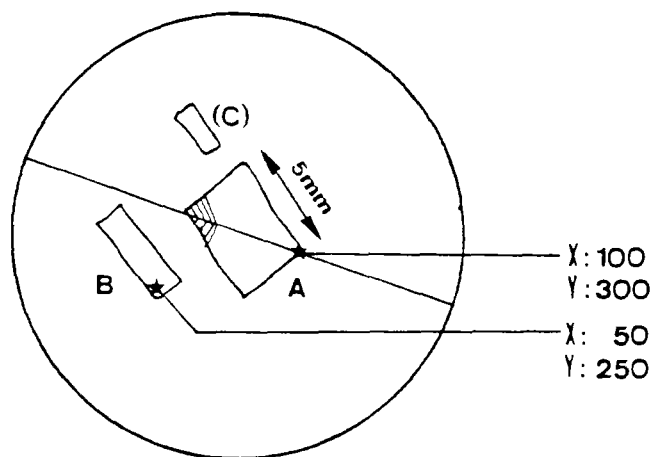


FIG.2.7 : LOCALISATION DES MINERAUX ETUDIES SUR L'ECHANTILLON 12.00
DIAMETRE DE LA SURFACE POLIE: $\phi = 20$ mm
Granite rubéfié+altération météorique

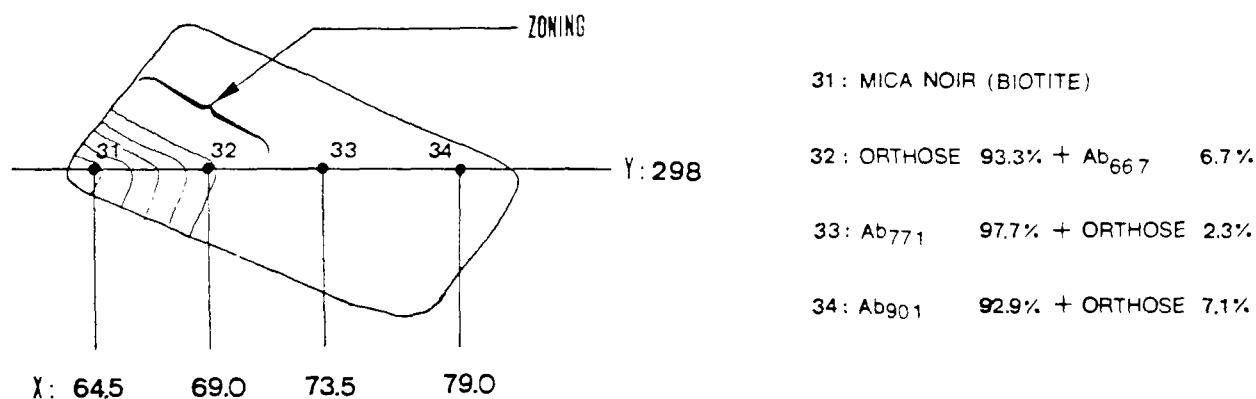


FIG.2.8 : ECH.12.00. MINERAL A. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE
PRINCIPAUX RESULTATS
Granite rubéfié+altération météorique

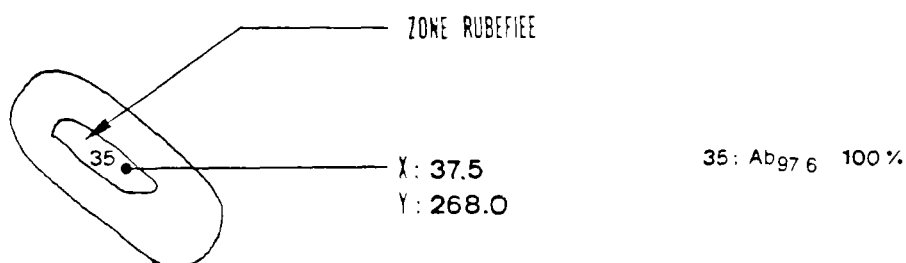
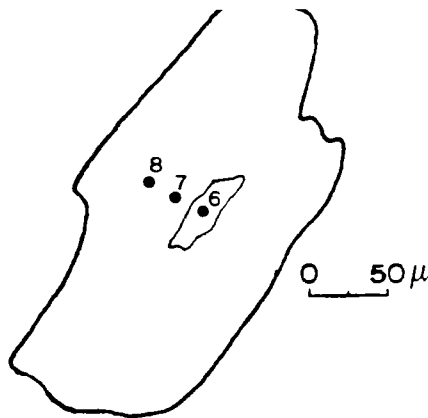


FIG.2.9 : ECH. 12.00. MINERAL B. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE
PRINCIPAUX RESULTATS
Granite rubéfié+altération météorique

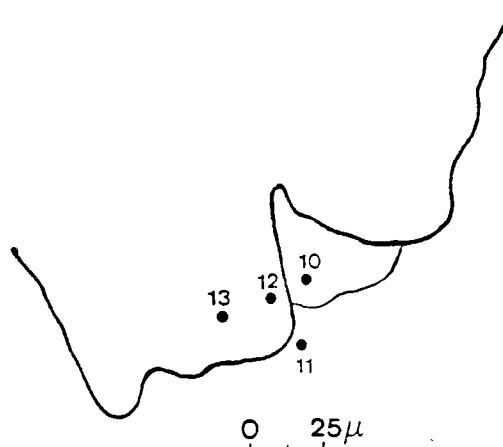


6: CHLORITE

7: MICA NOIR (BIOTITE)

8: MICA NOIR (BIOTITE)

FIG. 2.10: ECH. 272.50. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE. MINERAL A
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite gris G1 à l'aspect sain



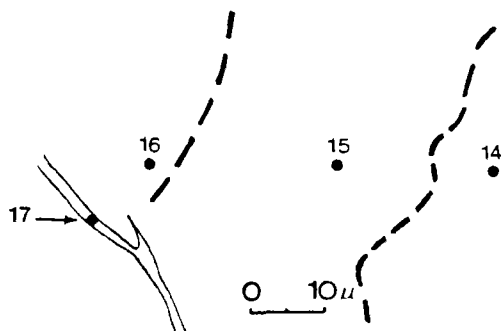
10: CALCITE

11: $Ab_{89.8}$ 97.1% + ORTHOSE 2.9%

12: CHLORITE

13: MICA NOIR (BIOTITE)

FIG. 2.11: ECH. 272.50. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE. MINERAL B
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite gris G1 à l'aspect sain



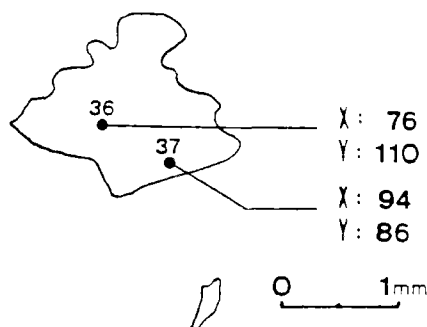
14: $Ab_{93.3}$ 100%

15: MICA NOIR (BIOTITE)

16: QUARTZ

17: VIDE

FIG. 2.12: ECH. 272.50. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE. MINERAL C
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite gris G1 à l'aspect sain



X: 76

Y: 110

X: 94

Y: 86

36: ORTHOSE 98.2% + Ab_{100} 1.8%

37: $Ab_{99.4}$ 99.4% + ORTHOSE 0.6%

FIG. 2.13: ECH. 301.80. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite très rubéfié

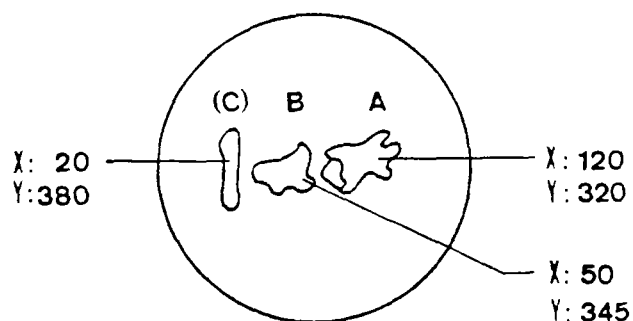


FIG.2.14: LOCALISATION DES MINERAUX ETUDIES SUR L'ECHANTILLON 825.84
DIAMETRE DE LA SURFACE POLIE : $\phi = 20$ mm
Granite très rubéfié

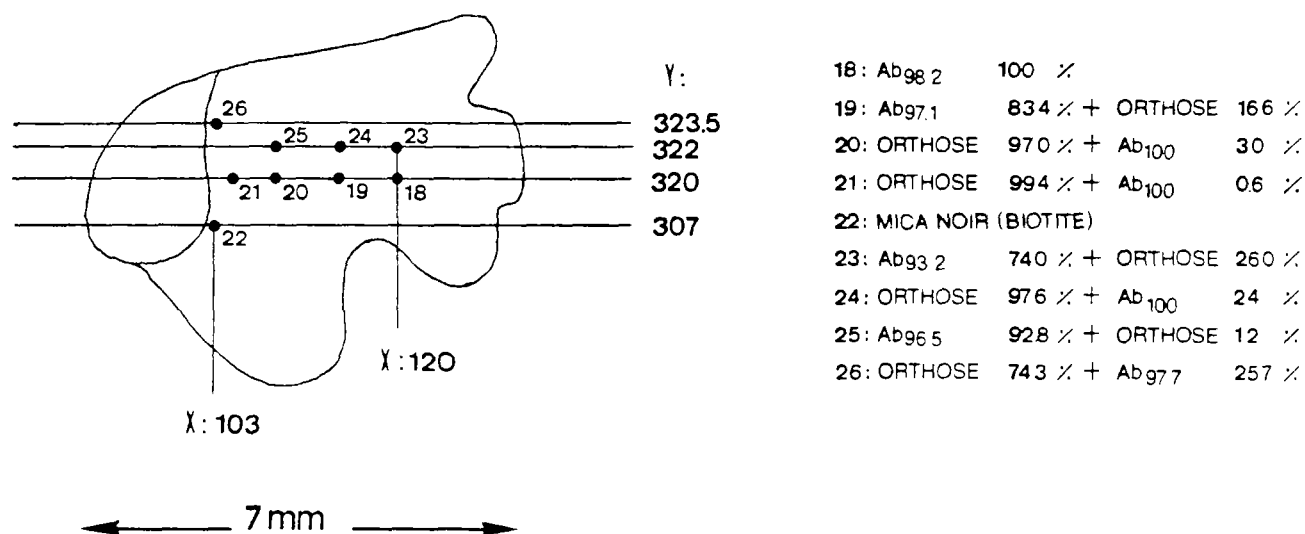


FIG.2.15: ECH.825.84. MINERAL A. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite très rubéfié

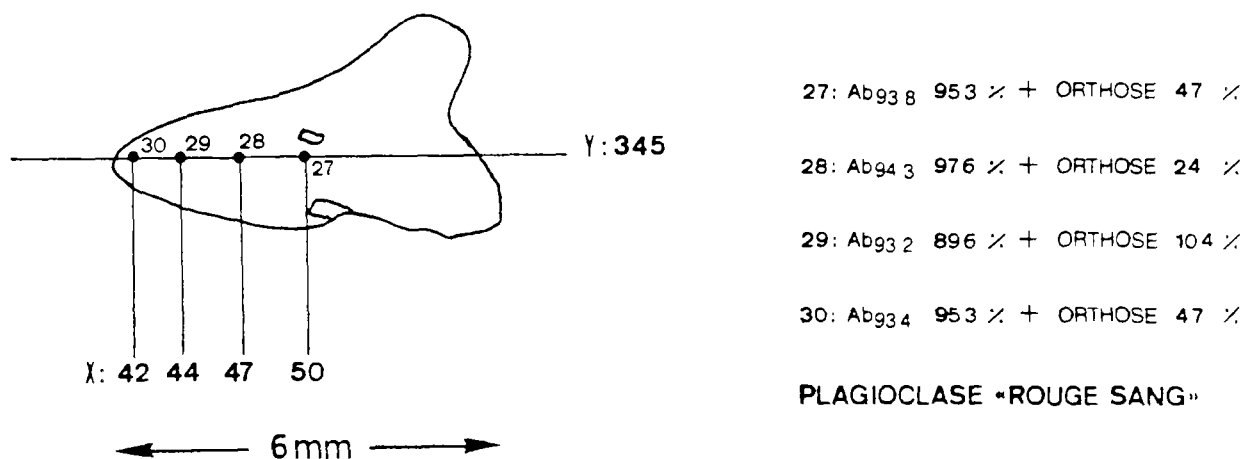


FIG.2.16: ECH.825.84. MINERAL B. LOCALISATION DES POINTS D'ANALYSE
PRINCIPAUX RESULTATS. Granite très rubéfié

Pt	Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	FeO (%)	Total (%)
31	0.070	9.423	37.112	18.742	9.372	0.100	3.014	0.057	0.505	17.146	95.541
32	0.331	0.000	65.573	18.687	15.788	0.270	0.000	0.008	0.000	0.106	98.762
33	8.783	0.039	63.166	23.970	0.344	4.702	0.000	0.026	0.014	0.063	101.107
34	9.292	0.075	63.964	21.602	1.730	1.824	0.000	0.042	0.000	0.224	98.754
35	11.140	0.140	65.734	20.055	0.273	1.387	0.005	0.012	0.000	0.160	98.907

Tableau 2.4.a : Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 12.00.

Pt	Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	FeO (%)	Total (%)
1	0.004	0.030	97.807	0.142	0.020	0.030	0.000	0.013	0.021	0.085	98.156
2	0.123	9.636	35.855	18.056	9.277	0.103	2.969	0.056	0.490	16.773	93.339
3	0.000	0.037	99.182	0.142	0.022	0.058	0.000	0.000	0.002	0.120	99.563
4	10.283	0.015	66.193	21.744	0.468	2.214	0.003	0.017	0.014	0.094	101.044
5	10.091	0.032	63.695	20.905	0.335	2.188	0.000	0.006	0.017	0.073	97.373
6	0.043	16.639	27.880	16.515	0.061	0.190	0.348	0.068	0.754	20.182	82.680
7	0.075	9.712	35.619	17.764	9.668	0.021	2.703	0.062	0.452	16.588	92.665
8	0.058	10.286	36.238	18.341	9.275	0.000	2.758	0.077	0.535	16.791	94.359
9	0.485	0.000	63.566	18.678	15.354	0.051	0.069	0.016	0.000	0.146	98.365
10	0.060	0.165	0.743	0.149	0.012	49.765	0.000	0.003	1.395	0.493	52.786
11	9.982	0.066	64.819	21.323	0.521	2.029	0.000	0.000	0.033	0.146	98.920
12	0.034	12.067	30.183	17.657	4.892	0.090	1.503	0.085	0.670	19.470	86.651
13	0.054	9.181	33.697	17.248	9.543	0.000	2.748	0.050	0.518	16.696	89.735
14	10.300	0.008	62.577	20.837	0.444	2.404	0.000	0.014	0.003	0.092	96.680
15	0.121	9.210	34.898	18.166	8.808	0.137	2.640	0.060	0.566	17.402	92.010
16	0.004	0.021	99.306	0.127	0.011	0.029	0.021	0.000	0.009	0.093	99.621
17	0.218	1.848	86.509	3.411	0.444	1.345	0.203	0.008	0.034	2.230	96.249

Tableau 2.4.b : Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 272.50.

Pt	Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	FeO (%)	Total (%)
36	0.333	0.000	62.532	18.253	15.998	0.002	0.000	0.000	0.000	0.085	97.204
37	11.149	0.080	66.223	19.415	0.359	0.122	0.000	0.000	0.001	0.151	97.500

Tableau 2.4.c : Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 301.80.

Pt	Na ₂ O (%)	MnO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	FeO (%)	Total (%)
18	11.410	0.017	67.435	19.511	1.440	0.398	0.000	0.036	0.040	0.089	99.079
19	8.806	0.019	62.676	18.675	4.311	0.451	0.000	0.028	0.000	0.550	95.516
20	0.297	0.000	63.950	18.439	15.897	0.000	0.002	0.022	0.000	0.021	98.629
21	0.277	0.000	60.960	17.994	15.806	0.010	0.000	0.008	0.002	0.076	95.134
22	0.218	2.262	47.244	30.454	10.880	0.000	0.121	0.009	0.006	3.408	94.606
23	7.619	0.167	62.963	20.869	4.574	1.022	0.000	0.000	0.009	0.365	97.589
24	0.286	0.000	64.046	18.471	16.022	0.004	0.000	0.014	0.007	0.050	98.901
25	10.113	0.233	65.051	20.823	1.201	0.677	0.000	0.000	0.008	0.298	98.404
26	2.763	0.000	62.491	18.327	12.168	0.120	0.000	0.009	0.005	0.247	96.130
27	9.608	0.158	61.379	19.504	1.210	1.168	0.000	0.032	0.007	0.183	93.249
28	10.544	0.045	65.347	20.536	0.518	1.152	0.000	0.018	0.016	0.148	98.324
29	8.946	0.145	63.515	23.012	1.716	1.170	0.000	0.000	0.018	0.141	98.665
30	8.934	0.110	64.348	22.409	1.423	1.167	0.000	0.025	0.009	0.133	98.557

Tableau 2.4.d : Analyses chimiques à la microsonde (pourcentages pondéraux) effectuées sur l'échantillon 825.84.

2.5.2.1.2. - Interprétations des analyses chimiques des feldspaths :

Pour chaque analyse de feldspath, nous avons effectué le traitement suivant :

Nous calculé la proportion molaire théorique des pôles albite (Ab) $\text{Si}_2\text{AlO}_6\text{Na}$, anorthite (An) $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ et orthose (Or) $\text{Si}_2\text{AlO}_6\text{K}$. A partir du nombre de moles d'albite et d'anorthite, nous avons déterminé la composition du plagioclase correspondant en l'exprimant en pourcentage molaire d'albite. La quantité restante d'orthose en pourcentage molaire a été rapportée au nombre de moles total de feldspath.

Enfin, le reste est exprimé en moles d'oxyde.

En ce qui concerne les plagioclases, les résultats sont exprimés en pourcentage d'albite.

La totalité des résultats figure dans les tableaux tableaux 2.5.a, 2.5.b, 2.5.c et 2.5.d.

Les compositions théoriques des plagioclases sont de type oligoclasique. Cependant, on note que les plagioclases très rubéfiés ont des compositions très proches du pôle albitique (Ab > 90 %), alors que ceux qui appartiennent au faciès sain (plagioclases blancs ou très légèrement roses) ont généralement un taux d'albite inférieur à 90 %.

Dans le cas de l'échantillon 12.00, les compositions des plagioclases sont plus variables :

- Ab 97.6 (point 35) ;
- Ab 77.1 (point 33) ;
- les proportion de fer également:
- 0 mole FeO/1000 moles d'Ab (point 33)
- 11 moles FeO/1000 moles d'Ab (point 34)

On constate dans les faciès rubéfiés une proportion de fer légèrement plus élevée que dans le faciès sain. Ce phénomène est accentué pour les plagioclases très rubéfiés de l'échantillon 825.84. Les points d'analyses 25, 29 et 30 semblent témoigner de l'existence de crypto-minéraux ferromagnésien silicatés, les points 19 et 23 de produits d'altération alumineux riches en fer.

On peut supposer que la nature plus albitique des plagioclases rubéfiés est due à un lessivage des ions Ca^{++} (surtout au coeur des minéraux)

Notes	Signification des notes relatives aux tableaux 2.5.a,b,c,d
(1)	nombre de moles de l'oxyde considéré rapporté à 1000 moles du pôle feldspathique dominant
(2)	composition du plagioclase en pourcentage molaire d'albite
(3)	pourcentage molaire d'orthose rapporté au nombre total de moles de feldspath.

Pt	Ab (1)	An (1)	Or (1)	SiO ₂ (1)	Al ₂ O ₃ (1)	MgO (1)	K ₂ O (1)	CaO (1)	Na ₂ O (1)	FeO (1)	Ab% (2)	Or% (3)
33	1000	296	30	22	15	4	0	0	0	0	Ab 77.1	2.2
34	1000	110	85	71	53	7	0	0	0	11	Ab 90.1	7.1
35	1000	24	0	0	15	0	9	46	0	6	Ab 97.6	0.0
32	32	16	1000	38	16	0	0	0	0	3	Ab 66.7	93.3

Tableau 2.5.a : Exploitation des analyses chimiques des feldspaths.
Echantillon 12.00

Pt	Ab (1)	An (1)	Or (1)	SiO ₂ (1)	Al ₂ O ₃ (1)	MgO (1)	K ₂ O (1)	CaO (1)	TiO ₂ (1)	FeO (1)	Ab% (2)	Or% (3)
4	1000	120	27	13	10	0	3	0	0	0	Ab 89.3	2.3
5	1000	242	26	0	1	0	1	0	0	0	Ab 80.5	2.0
11	1000	114	34	27	17	3	0	0	0	7	Ab 89.8	2.9
14	1000	72	0	0	44	0	16	72	0	3	Ab 93.3	0.0
9	45	3	1000	104	36	0	0	0	3	6	Ab 93.3	95.4

Tableau 2.5.b : Exploitation des analyses chimiques des feldspaths.
Echantillon 272.50

Pt	Ab (1)	An (1)	Or (1)	SiO ₂ (1)	Al ₂ O ₃ (1)	MgO (1)	K ₂ O (1)	CaO (1)	Na ₂ O (1)	FeO (1)	Ab% (2)	Or% (3)
37	1000	6	18	0	12	6	0	0	0	6	Ab 99.4	1.8
36	18	0	1000	12	18	0	0	0	0	3	Ab 100	98.2

Tableau 2.5.c : Exploitation des analyses chimiques des feldspaths.
Echantillon 301.80

Pt	Ab (1)	An (1)	Or (1)	SiO ₂ (1)	Al ₂ O ₃ (1)	MgO (1)	K ₂ O (1)	CaO (1)	Na ₂ O (1)	FeO (1)	Ab% (2)	Or% (3)
18	1000	18	0	12	0	0	3	0	0	0	Ab 98.2	0.0
19	1000	29	206	0	11	0	59	0	0	26	Ab 97.1	16.6
23	1000	73	376	0	73	17	9	0	0	21	Ab 93.2	26.0
25	1000	37	80	20	50	17	0	0	0	13	Ab 96.5	7.2
27	1000	60	53	0	23	13	0	0	0	7	Ab 93.8	4.7
28	1000	61	26	6	19	0	3	3	0	6	Ab 94.3	2.4
29	1000	74	125	154	147	11	0	0	0	7	Ab 93.2	10.4
30	1000	71	52	276	142	11	0	0	0	7	Ab 93.4	4.7
20	31	0	1000	50	19	0	0	0	0	0	Ab 100	97.0
21	6	0	1000	12	24	0	0	0	9	3	Ab 100	99.4
24	25	0	1000	50	19	0	0	0	0	0	Ab 100	97.6
26	339	8	1000	0	20	0	0	0	4	12	Ab 97.7	74.3

Tableau 2.5.d : Exploitation des analyses chimiques des feldspaths.
Echantillon 825.84

2.6 - Conclusion du chapitre 2 :

Les analyses des éléments majeurs à l'échelle de la roche montrent une homogénéité de la composition chimique du granite d'Auriat. Cependant, il serait prématuré d'en tirer des conclusions quant aux processus d'altération de la matrice granitique.

Les analyses à la microsonde semblent montrer que la rubéfaction des feldspaths et plus particulièrement des plagioclases, serait liée en partie à un lessivage du fer des ferro-magnésiens. Celui-ci serait fixé, probablement sous forme d'hydroxydes ou d'oxydes, par les plagioclases. Leur existence est confirmée par l'étude pétrographique au microscope optique et électronique. Cependant, la connaissance des modalités de migration et de fixation de ces ions, demanderait une étude approfondie qui dépasse le programme de recherche que nous nous sommes fixé.

L'étude mécanique qui suit, permettra de caractériser le comportement mécanique du granite en fonction de son altération, aussi bien à l'échelle du grain que de la roche.

- CHAPITRE 3 -

CARACTERISATION MECANIQUE DES ALTERATIONS DU GRANITE D'AURIAT

3.1. - Introduction :

La caractérisation mécanique du granite d'Auriat a été réalisée à deux échelles :

- **microscopique** : au moyen de l'essai de microdureté Vickers.
- **macroscopique** : par l'étude des vitesses de propagation des ondes soniques puis par la réalisation d'essais classiques de résistance à la compression sur mini-éprouvettes cylindriques ($\varnothing = 20\text{mm}$, $H = 40\text{mm}$).

3.2. - Etude mécanique des altérations à l'échelle du minéral par la mesure des microduretés Vickers :

3.2.1. - Introduction :

La dureté d'un corps est généralement définie comme étant la résistance mécanique qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps dur. Les valeurs que l'on peut donner de la dureté dépendent non seulement des caractéristiques élastiques et plastiques de la matière, mais aussi de la forme et de la nature du pénétrateur ainsi que du mode opératoire. C'est pourquoi on est obligé de distinguer, selon la méthode d'examen, plusieurs "duretés technologiques" : duretés "Vickers", "Knoop" et "Brinell" (pénétration), dureté "Rockwell" (rebondissement) etc. Ainsi les valeurs obtenues par pénétration traduisent essentiellement les caractéristiques plastiques de la matière tout en dépendant de la forme du pénétrateur.

L'essai de microdureté Vickers est un essai de dureté Vickers, effectué avec des charges très petites (cf. fig. 3.1). H. BÜCKLE (1960) considère l'essai de microdureté comme un examen local de la dureté, intéressant les grains ou constituants individuels de la structure micrographique des échantillons à examiner. D'après cette conception, le caractère distinctif de la microdureté serait le fait que le diamètre d'empreinte reste au dessous de l'ordre de grandeur du grain de l'éprouvette étudiée.

L'essai de dureté Vickers, effectué sous certaines conditions de charge, est un des seuls essais permettant de déterminer les caractéristiques mécaniques à l'échelle du minéral (la taille des empreintes Vickers est de l'ordre du micromètre, celle des minéraux constitutifs du granite est comprise entre le millimètre et la dizaine de centimètre). Nous avons axé notre travail sur les feldspaths, afin de quantifier les effets mécaniques des différents types d'altération pouvant les affecter.

D'autre part, nous avons étudié les caractéristiques au niveau des zonations des plagioclases et des feldspaths alcalins. Ces zonations sont généralement d'origine pétrogénétiques mais également liées à des phénomènes d'altération plus tardifs (par exemple l'altération hydrothermale qui entraînerait une rubéfaction différentielle du minéral). Nous nous sommes intéressé plus spécialement à cet aspect du problème.

3.2.2. - Description de l'essai :

3.2.2.1 - Principe de l'essai :

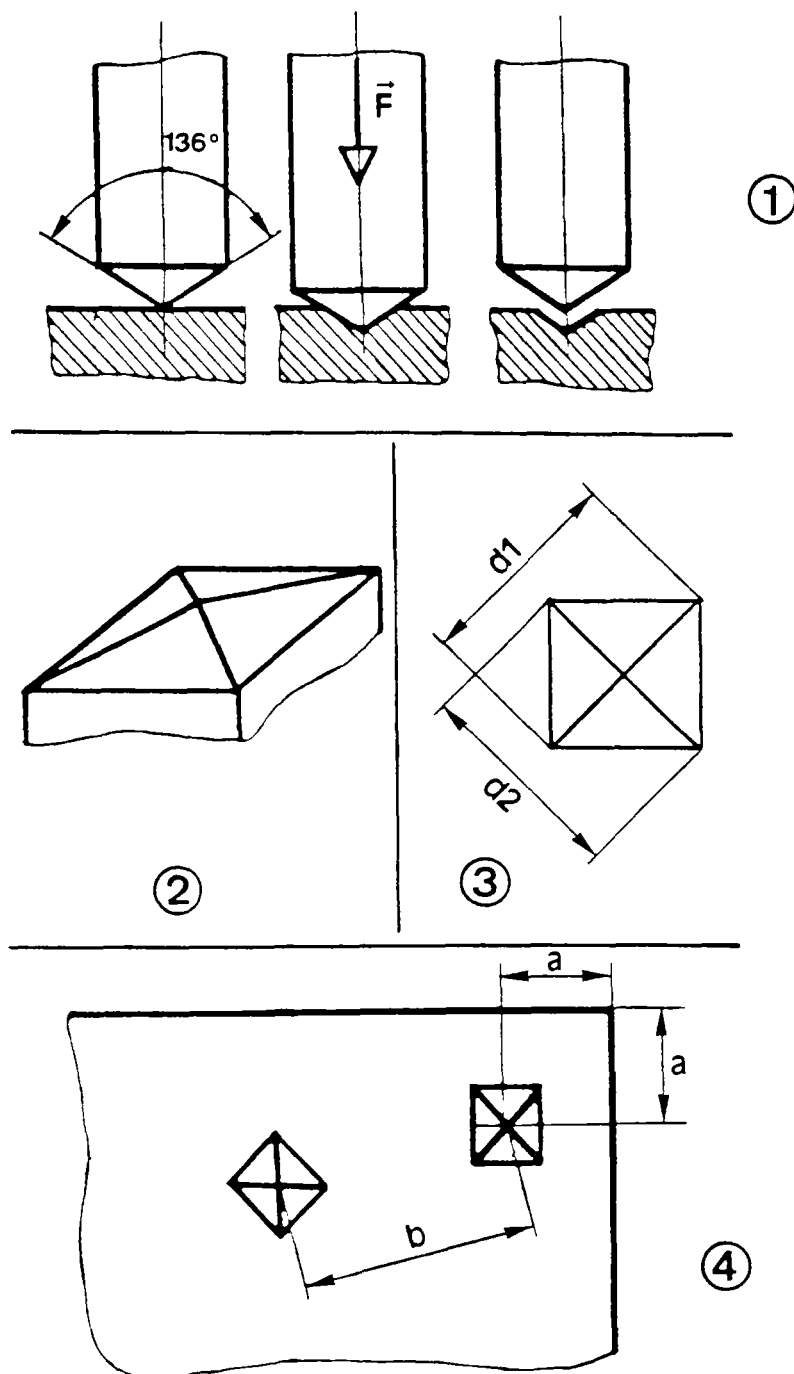


FIG.3.1 : 1) schématisation des phases de l'essai de dureté Vickers.

2) géométrie de l'empreinte.

3) l'empreinte est caractérisée par la moyenne des diagonales d_1 et d_2 (d_1 et d_2 étant les projections des arêtes de la pyramide sur le plan horizontal).

4) distances minimales à respecter entre deux empreintes pour éviter les interférences.

L'essai de microdureté Vickers est un essai statique. Il consiste à appliquer très lentement sur le matériau à tester un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet 136°, sous une charge P, et à mesurer la diagonale de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge. La fig.3.1 schématise les différentes phases de l'essai ainsi que les caractéristiques géométriques de l'empreinte.

3.2.2.2. - Matériel utilisé :

Le microduromètre DURIMET fabriqué par E.LEITZ, Ltd., Wetzlar représenté dans l'annexe 2, a été utilisé pour réaliser ces essais.

3.2.2.3. - Conditions de l'essai :

L'essai est normalement effectué à température ambiante.

La charge doit être appliquée progressivement sans choc ni vibration. Le microduromètre a été installé à niveau sur une table antivibrations. Le temps de descente a été fixé à 17 s et le temps de contact réglé à 13 s selon les spécifications du constructeur.

Avant d'être testé, l'échantillon doit-être préparé sous forme de surface polie parfaitement plane. Dans le cas d'un matériau naturel non métallique tel que le granite, la technique employée est le polissage mécanique avec du "carborundum" (carbure de silicium SiC). Dans notre cas, la finesse du polissage a été portée à 2 µm.

3.2.2.4. - Expression des résultats :

3.2.2.4.1. - Symboles:

Hv : microdureté Vickers (Kg/mm²)

P : charge (g)

d : diagonale moyenne (µm)

Remarque : dans la grande majorité des publications où le concept de microdureté est utilisé (par exemple la documentation la plus récente du DURIMET), les auteurs expriment les résultats de microdureté en Kg/mm². Par souci de clarté, nous adopterons cette unité de pression en rappelant cependant les correspondances avec le système d'unité international :

$1 \text{ Kg/mm}^2 \leftrightarrow 10^{-2} \text{ bar} \leftrightarrow 10^3 \text{ Pa} \leftrightarrow 1 \text{ KPa}$

3.2.2.4.2. - Formulation de la microdureté Vickers :

$$Hv = \frac{\text{Charge}}{\text{Surface de l'empreinte}} \quad (3.1)$$

Sachant que le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée d'angle au sommet 136°, on exprime Hv en fonction de la diagonale moyenne d et la charge P :

$$H_v = \frac{2 \cdot P \cdot \sin 68^\circ}{d^2} \quad (3.2)$$

$$H_v = c \cdot \frac{P}{d^2} \quad (3.3)$$

$$H_v = \frac{1854.4 \cdot P}{d^2} \quad \left[\begin{array}{l} H_v \text{ en Kg/mm}^2 \\ P \text{ en g} \\ d \text{ en } \mu\text{m} \end{array} \right] \quad (3.4)$$

Remarque : la valeur de c ne dépend que des caractéristiques géométriques du pénétrateur.

3.2.2.5. - Causes d'erreurs :

3.2.2.5.1. - Durée de l'expérience :

Plus les temps de descente et de contact sont longs et plus les risques de vibrations sont grands. Cependant, il est indispensable que le pénétrateur arrive au contact de la surface avec une vitesse proche de la nullité.

3.2.2.5.2. - Erreurs de lecture :

Au mieux, on peut apprécier 0.25 μm sur la mesure des diagonales.

En admettant une erreur relative dH_v/H_v de 10 %, on obtiendrait des résultats significatifs de la microdureté qu'en mesurant des empreintes de taille supérieure ou égales à 5 μm . La relation (3.4) étant hyperbolique, il en résulte que plus l'empreinte sera grande et plus les conséquences d'une erreur de lecture seront petites.

3.2.2.5.3. - Erreur sur la charge - Notions d'indice de Meyer et de dureté Grodzinski :

3.2.2.5.3.1. - Notion d'indice de Meyer :

Le pourcentage d'erreur sur la dureté Vickers dépend directement du pourcentage d'erreur sur la charge (B.W. MOTT, 1956). En effet, si l'on dérive la micro-dureté par rapport à la charge on obtient la relation suivante :

$$\frac{dH_v}{H_v} = \frac{dP}{P} \quad (3.5)$$

La taille de l'empreinte est théoriquement proportionnelle à la racine carrée de la charge, quelle que soit cette dernière.

Si l'on fait une série de mesures de diagonales avec des charges différentes, on devrait pouvoir tracer dans un repère logarithmique la droite d'équation :

$$\log P = \log \left[\frac{Hv}{c} \right] + 2 \cdot \log d \quad (3.6)$$

Cette expression est obtenue en prenant le logarithme de l'expression (3.3).

Si l'on fait l'approximation que les empreintes ont été réalisées sur une surface homogène, aussi bien dans le plan que dans l'espace, la pente de cette droite devrait être strictement égale à 2.

En fait, il s'avère qu'on obtient une droite expérimentale d'équation :

$$\log P = \log a + m \cdot \log d \quad \text{soit } P = a \cdot d^m \quad (3.7)$$

où m oscille autour de 2.

L'expression (3.7) est appelée droite de Meyer et sa pente m l'indice de Meyer. La valeur de cet indice n'est pas *a priori* caractéristique du matériau testé mais exprime les différences de l'état de dureté superficiel, éventuellement dues au polissage ou à l'hétérogénéité de la composition du volume superficiel testé. Les relations existant entre l'indice de Meyer, la microdureté et la charge sont détaillées dans le tableau 3.1.

$m < 2$	Hv diminue quand on augmente la charge
$m = 2$	Hv reste constant quelque soit la valeur de la charge
$m > 2$	Hv augmente quand on augmente la charge

Tableau 3.1 : Relations entre l'indice de Meyer m , la charge et la microdureté Hv, lorsque l'on calcule la dureté Hv par l'expression (3.4).

Afin d'illustrer notre propos, nous avons représenté sur les fig.3.2.a, 3.2.b et 3.2.c des droites de Meyer caractéristiques (respectivement $m < 2$, $m = 2$ et $m > 2$). La totalité des résultats figure dans l'annexe 3.

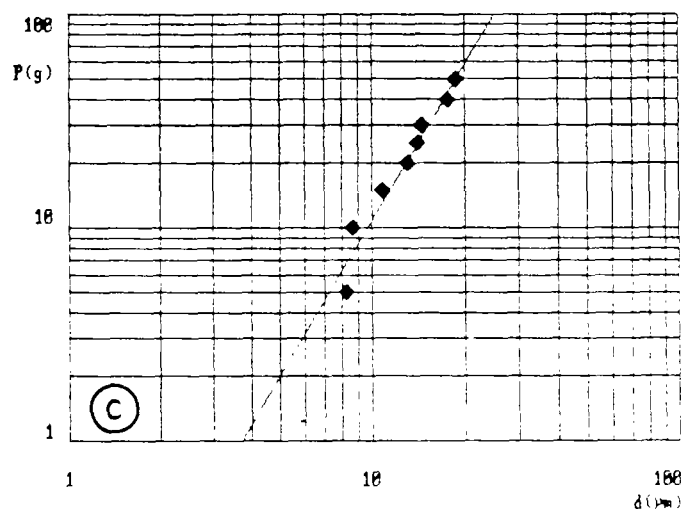
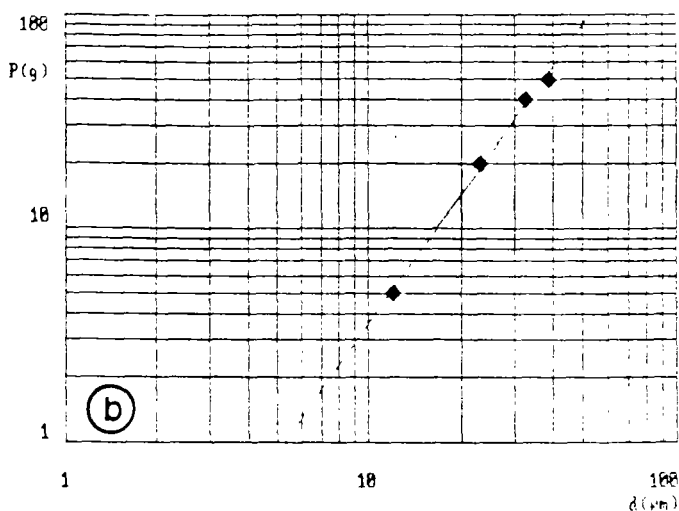
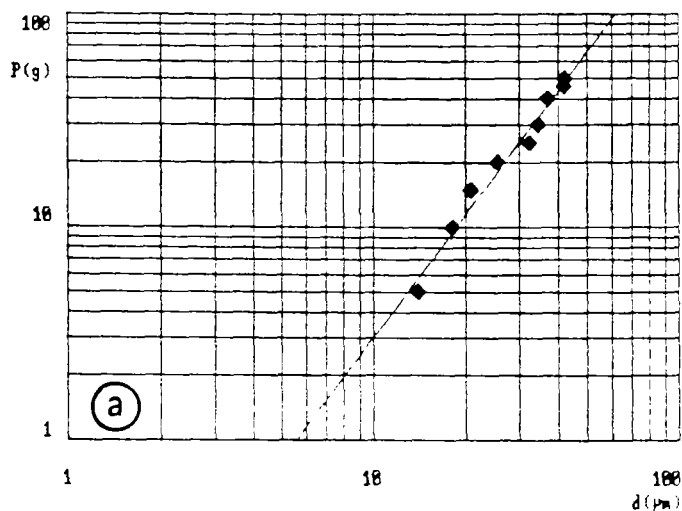
3.2.2.5.3.2. - Détermination de la microdureté Vickers au sens de Grodzinski :

En combinant les expressions (3.3) (définition de la microdureté) et (3.7) (loi de Meyer), on obtient la relation :

$$Hv = c \cdot \frac{a \cdot d^m}{d^2} \quad \text{soit} \quad Hv = c \cdot a \cdot d^{m-2} \quad (3.8)$$

L'expression de la diagonale d en fonction de la charge et du coefficient a , peut être extraite de l'expression de Meyer (3.7) :

$$d^m = \frac{P}{a} \quad \text{d'où} \quad d = \frac{P^{1/m}}{a^{1/m}} \quad (3.9)$$



- a) Echantillon 513.88.
Minéral 2 : plagioclase rubéfié avec liséré blanc.
 $m = 1.915$
- b) Echantillon 969.33.
Minéral 4 b) : biotite verte.
 $m = 2.002$
- c) Echantillon 513.88.
Minéral 1 : liséré autour d'un plagioclase rubéfié.
 $m = 2.417$

FIG.3.2 : Exemples de détermination de l'indice de Meyer pour quelques minéraux.

En remplaçant d par (3.9) dans l'expression (3.8) on obtient la relation :

$$H_v = c * a * \left[\frac{p^{1/m}}{a^{1/m}} \right]^{(m-2)} \quad (3.10)$$

ce qui donne finalement l'expression :

$$H_v = c * a^{2/m} * p^{(m-2)/m} \quad (3.11)$$

Les expressions (3.8) et (3.11) montrent que la valeur de la microdureté calculée par (3.4) est dépendante à la fois de la taille de l'empreinte et de la charge, sauf dans le cas où $m=2$.

Dans le but d'obtenir une valeur de la microdureté indépendante de la charge, GRODZINSKI redéfinit une dureté H_{vc} , en déterminant à partir de la droite de Meyer la charge correspondant à une diagonale unitaire : 1 μm , 10 μm , 100 μm etc.

Pour obtenir H_{vc} , on réinjecte les valeurs de cette charge et de la diagonale unitaire correspondante dans l'expression (3.4) ce qui aboutit à l'expression (3.12). Ainsi, la dureté au sens de GRODZINSKI pour une diagonale unitaire de 10 μm s'exprimera de la façon suivante :

$$H_{vc} = 1854.4 * \frac{P_{10\mu m}}{(10)^2} \quad (3.12)$$

$P_{10\mu m}$ est exprimé en grammes et H_{vc} en Kg/mm^2 .

3.2.2.5.4. - Mise en évidence de l'effet perturbateur du polissage sur l'état de surface du minéral testé :

Le polissage de la surface à tester est effectué avec une poudre abrasive de "carborundum" (carbure de silicium SiC). Successivement, on soumet l'échantillon à un polissage à 60, 40, 5 et 2 μm . On baigne ensuite la surface polie dans un bac à ultrasons pendant une quinzaine de minute afin d'éliminer les particules d'abrasif. Le contrôle du polissage se fait à l'aide du microduromètre réglé au grossissement X 400. Le travail étant fait entièrement manuellement, il est très difficile de normaliser l'essai. De plus, on constate que la qualité du polissage varie suivant la nature minéralogique.

Nous avons représenté pour 6 minéraux des échantillons 301.80 et 969.66, la dureté moyenne en fonction de la profondeur de l'empreinte (cf.fig.3.3.a, 3.3.b, 3.3.c, 3.3.d, 3.3.e et 3.3.f).

Pour les échantillons 301.80 minéral N°4 (feldspath) et 969.66 minéraux N°2.3.a et 4 (feldspath), la microdureté augmente avec la profondeur de l'empreinte. Dans ce cas, le polissage aurait déstabilisé sur quelques microns (jusqu'à 4 μm) la couche superficielle du minéral étudié.

Pour les échantillons 301.80 minéral N°1 (biotite) et N°3.c (feldspath), la microdureté diminue avec la profondeur de l'empreinte. Dans ce cas, le polissage aurait induré artificiellement la couche superficielle du minéral.

De manière générale, il apparaît que la microdureté réelle n'est accessible qu'avec des charges relativement fortes. Il n'est pas possible de fixer une valeur idéale de la charge à utiliser. En effet, la charge minimale à employer pour atteindre la microdureté réelle varie suivant l'espèce minérale et son niveau d'altération.

On ajoutera qu'il serait dangereux de se contenter d'une seule série de mesures réalisée avec une charge élevée. En effet, les empreintes réalisées avec de fortes charges ont souvent comme effet de provoquer des éclats aux angles de l'empreinte (cf.paragraphe 3.2.3.2.1.).

Nous pensons qu'il est très probable que les valeurs de l'indice de Meyer soient largement dépendantes de l'état de la couche superficielle, surtout lorsque les essais sont réalisés avec de faibles charges.

3.2.2.6. - Equivalence entre l'échelle de Mohs, les microduretés Vickers et Grodzinski :

Les géologues ont l'habitude d'appréhender empiriquement la notion de dureté.

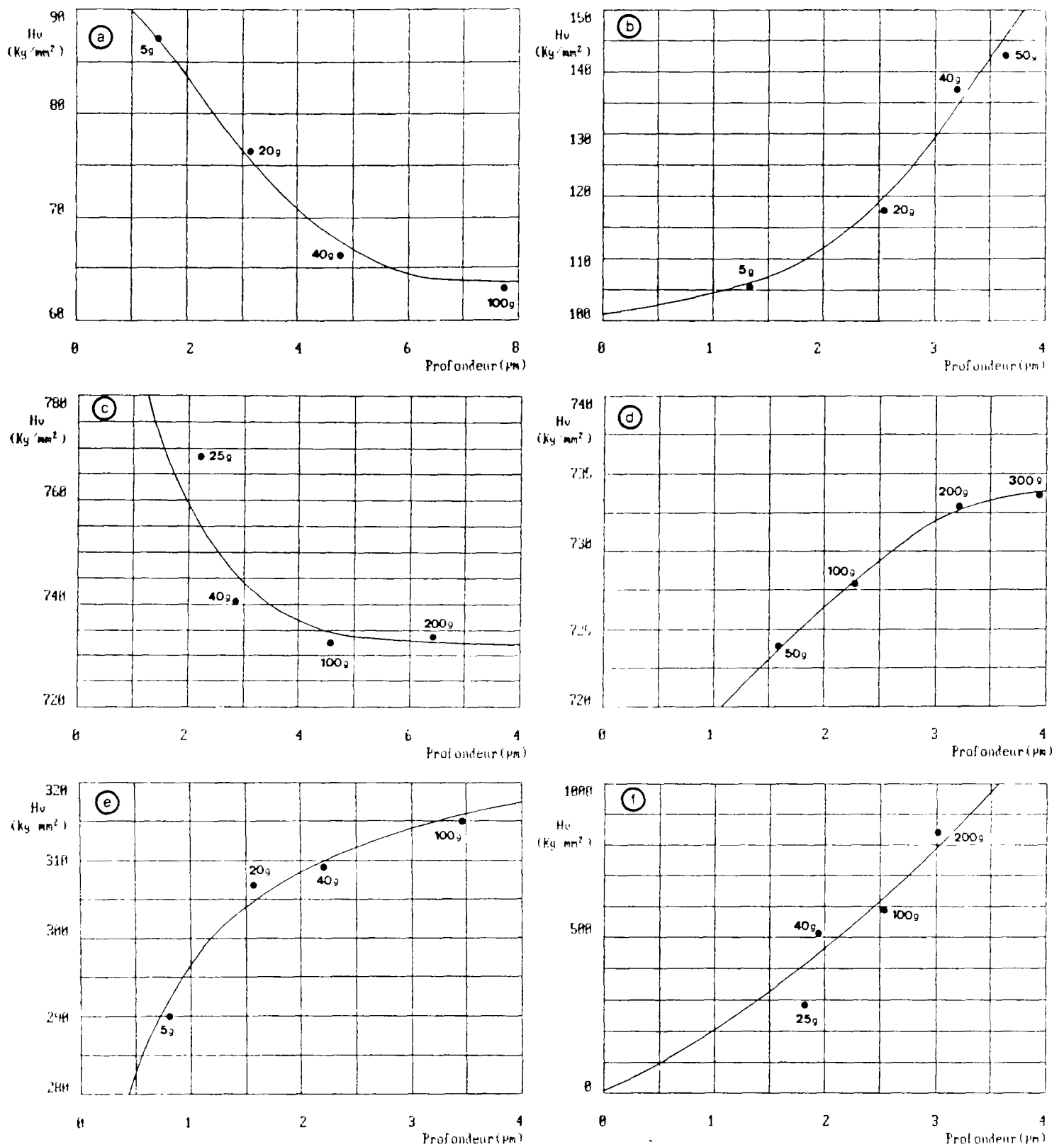


FIG.3.3 : Effet du polissage sur les valeurs de la microdureté Vickers.

- a) Ech.301.80. Minéral 1 : biotite
- b) Ech.969.66. Minéral 3 a) : feldspath potassique zoné
- c) Ech.301.80. Minéral 3 c) : plagioclase rubéfié
- d) Ech.301.80. Minéral 4 c) : feldspath rose pâle
- e) Ech.969.66. Minéral 2 : feldspath rubéfié
- f) Ech.969.66. Minéral 4 f) : feldspath rose.

R.BROUSSE définit ainsi la dureté : "Pratiquement, on dit qu'un minéral est plus dur qu'un autre si le premier raye le second ; dix minéraux tests (échelle de Mohs) étant couramment choisis pour repérer la dureté d'un minéral" (in J.AUBOIN & al., 1975, p 184). Nous proposons dans le tableau 3.2 une équivalence entre l'échelle de Mohs et les microduretés Vickers, à partir de la compilation de données établie par B.W.MOTT (1956).

Echelle de Mohs	Hv(Kg/mm ²) Charge=50g	HvG(Kg/mm ²) d = 10 µm	Indice de Meyer
1 Talc	47	2	1.72
2 Gypse	60	68	1.78
3 Calcite	145	167	2.15
4 Fluorine	200	248	1.90
5 Apatite	659	610	1.25
6 Orthose	714	860	0.93
7 Quartz	1180	1120	1.44
8 Topaze	1648	1110	1.44
9 Corindon	2085	----	----
10 Diamant	10060	----	----

Tableau 3.2 : Equivalence entre l'échelle de Mohs et les microduretés Vickers (celles-ci d'après B.W.MOTT, 1956).

3.2.3. - Présentation et interprétation des résultats :

3.2.3.1. - Introduction :

La mesure de la dureté Vickers a été choisie parce que c'est un des seuls essais mécaniques réalisables à l'échelle du cristal.

Nous avons effectué des essais de microdureté sur 13 échantillons et 69 grains dans le but de corréler leur dureté Vickers avec leur état d'altération. Nous avons orienté plus particulièrement notre étude sur les zonations d'altération des feldspaths. Nous avons cherché à valider nos résultats par un traitement statistique simple à une variable. On montre que l'examen des paramètres de position et de dispersion des séries de mesures de microdureté, peut permettre de mieux cerner les domaines d'isodureté dans un même minéral. La totalité des résultats est consignée dans les tableaux 3.6.a et 3.6.b.

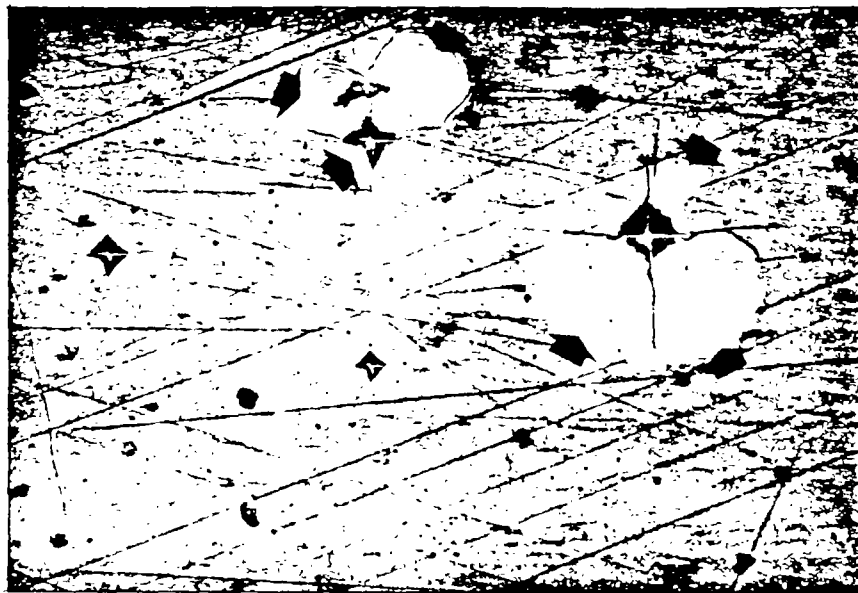


FIG.3.4 : Empreintes de Vickers sur une surface de verre. Ecaillures à la surface pour les charges de 100 à 50 p (p : pond ; 1 pond <--> 1 g), et petits éclats pour les charges plus faibles. Verre Schott SFS 1 (d'après notice LEITZ).

3.2.3.2. - Difficultés rencontrées :

3.2.3.2.1. - Détermination de la taille des diagonales :

Les essais de microdureté posent un certain nombre de problèmes pour les matériaux vitreux. La fig. 3.4 montre une série d'empreintes Vickers réalisées sur une surface de verre Schott SFS 1 (notice d'utilisation 72-5/frz Microduromètre DURIMET Ernst LEITZ GMBH WETZLAR). On constate la présence d'écaillures pour les charges de 100 et 50 g, et de petits éclats pour les charges plus faibles. Dans les cas du quartz et des feldspaths, on observe le même type d'empreinte, l'écaillage aux angles étant souvent plus prononcé.

Pour atténuer cet effet et pouvoir effectuer des mesures, nous avons souvent été amenés à travailler avec des charges très faibles (de 5 à 15 g).

3.2.3.2.2. - Nombre de mesures :

La détermination des indices de Meyer, et par conséquent des microduretés au sens de GRODZINSKI, n'a pas toujours été possible. En effet, les surfaces testées sont souvent trop petites pour pouvoir effectuer plusieurs séries de mesures dans une large gamme de charges, sans risque d'interférences entre les différentes empreintes (cf.fig.3.1). Parfois, il n'est possible de réaliser que quelques mesures, voire une seule empreinte, sur le domaine considéré.

3.2.3.2.3. - Orientation des minéraux testés :

Les essais ont été effectués sur des surfaces polies où il n'a pas été possible de connaître l'orientation cristallographique des minéraux testés. Le tableau 3.3 donne une idée de l'influence de ce paramètre pour le quartz et le cristal de roche.

Faces cristallographiques	charges (g)	d (µm)	Hv (Kg/mm ²)	Indice de Meyer
QUARTZ				
⊥ axe optique	50	--	1103	--
axe optique	50	--	1260	--
Face naturelle 1010	--	10	1120	1.44
Face naturelle 1011	--	10	1130	1.27
CRISTAL DE ROCHE				
Face naturelle 1010	--	10	1230	1.10
Face naturelle 1011	--	10	1040	1.35
Face polie 1010	--	10	1300	1.05

Tableau 3.3 : Influence de de l'orientation cristallographique de cristaux de quartz et de cristal de roche sur la microdureté Vickers (d'après B.W. MOTT, 1956)

3.2.3.3.- Traitement statistique des données de microdureté :

3.2.3.3.1. - Introduction :

Lorsque le nombre de mesures le permettait, nous avons réalisé un traitement statistique. Sur chaque série de mesures, nous avons déterminé d'une part les paramètres classiques de position : médiane, moyenne arithmétique et mode, et d'autre part les paramètres de dispersion : écart-type expérimental et étendue de la série.

3.2.3.3.2. - Etude des paramètres de position :

3.2.3.3.2.1. - Analyse des distributions et de leurs paramètres de position :

Les paramètres de position permettent de vérifier si la triple corrélation entre la couleur, le degré d'altération et la microdureté est significative dans le domaine d'étude choisi.

Nous avons regroupé sur les fig.3.5.a, 3.5.b, 3.5.c et 3.5.d quatre exemples représentatifs des types de distribution que nous avons rencontrés lors des essais.

a) **Distribution symétrique** (cf.fig.3.5.a) : la médiane, le mode et la moyenne se regroupent autour de la même valeur centrale. Le domaine est parfaitement homogène : la corrélation entre la couleur, l'état d'altération et la dureté est excellente.

b) **Distribution asymétrique** (cf.fig.3.5.b) : la médiane, le mode et la moyenne ne sont pas regroupés sur la même valeur centrale. Dans ce cas, on peut penser qu'une partie des empreintes a été effectuée sur une zone de transition entre deux domaines ayant des microduretés significativement

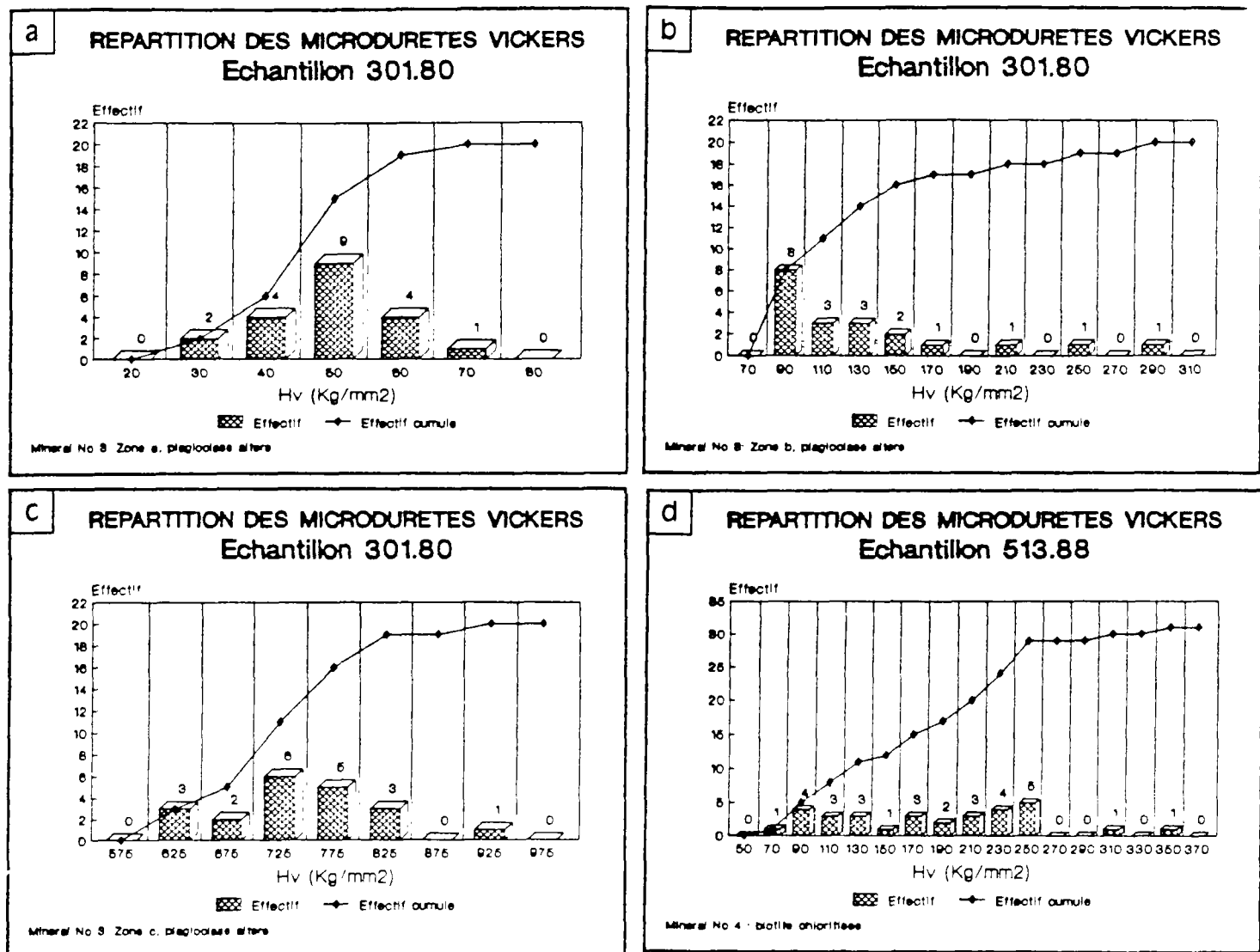


FIG.3.5 : Illustration des répartitions des microduretés Vickers rencontrées :
 a) distribution symétrique
 b) distribution asymétrique
 c) distribution plurimodale
 d) distribution quelconque

différentes. Le mode peut être considéré comme la valeur centrale caractéristique du domaine testé.

c) Distribution plurimodale (cf.fig.3.5.c) : il y a autant de domaines caractéristiques que de modes. Cependant si les modes ont des valeurs proches, deux interprétations sont possibles.

- * l'intervalle de classe a été mal choisi. Après correction, on aboutit à une distribution unimodale symétrique ou non.

- * l'intervalle de classe a été bien déterminé. Dans ce cas, les empreintes ont été réalisées sur deux domaines distincts, un nombre comparable d'essais ayant été effectués sur chacun d'entre eux.

d) Distribution quelconque (cf.fig.3.5.d) : Dans ce cas, il y a autant de sous domaines d'iso-microdureté que de maxima. Nous avons rencontré ce type de distribution exclusivement avec les biotites chloritisées et les chlorites.

Sur quelques micromètres, on passe d'un domaine très dur à un domaine très tendre. Etant donnée la grande dispersion des paramètres de position, il est impossible de définir un domaine d'iso-microdureté.

3.2.3.3.2.2. - Interprétation des résultats sur quelques exemples :

Nous avons regroupé dans le tableau 3.4 quelques exemples de distributions caractéristiques

Profondeur (m)	Réf.minéral testé	Microdureté Vickers (Kg/cm ²)			Nature du minéral testé
		Médiane	Moyenne	Mode(s)	
34.20	--	95.00	91.62	20.00 100.00 160.00	biotite chloritisée
217.20	N°1	48.82	50.35	47.50	plagioclase altéré
	N°2	56.50	55.69	47.80 57.50	plagioclase altéré
301.80	N°3.a	49.44	48.52	50.00	différents domaines d'un plagioclase rubéfié cf.fig.3.9
	N°3.b	113.33	131.84	90.00	
	N°3.c	741.67	743.82	625.00 725.00	
513.88	N°4	184.36	192.38	90.00 170.00 250.00	biotite chloritisée

tableau 3.4 : Exemples de distributions caractéristiques de microdureté

Les domaines testés sur les échantillons 217.20 N°1 (plagioclase altéré) et 301.80 N°3.a (zone d'un plagioclase rubéfié) ont été parfaitement délimités.

Le plagioclase rubéfié N°3.b de l'échantillon 301.80 présente une distribution asymétrique. Une partie des mesures semble avoir été effectuée sur le domaine c du même minéral (zone N°3.c).

Le plagioclase altéré 217.20 N°2 et le plagioclase rubéfié 301.80 N°3.c présentent des distributions bimodales ; les modes sont très proches et l'on peut envisager de changer les intervalles de classe pour décrire les distributions. Dans les deux, cas on choisira la moyenne comme valeur centrale caractéristique.

Les biotites chloritisées testées sur les échantillons 34.20 et 513.88 N°4 présentent des distributions polymodales (3 modes). Pour chacune d'entre elles, la moyenne et la médiane ont des valeurs groupées.

3.2.3.3.3. - Etude des paramètres de dispersion :

C'est en fonction de l'étendue et des effectifs de la série de mesure que l'on détermine les classes d'équivalence qui nous serviront par ailleurs, à déterminer les paramètres de position.

On constate que les étendues des séries de mesures varient suivant la microdureté caractéristique du domaine étudié (cf. tableau 3.5).

Profondeur (m)	Réf.minéral testé	Etendue de la série (Kg/mm ²)	Microdureté Vickers (Kg/mm ²)	Nature du minéral testé
12.00	N°2	1000	1317.28	Feldspath K
220.80	N°1	120	153.15	biotite saine
237.30	---	425	159.50	biotite chlor.
301.80	N°1	60	73.25	biotite saine
	N°3.a	40	48.52	différents domaines d'un plagio. rubéfié (cf.fig.3.9)
	N°3.b	200	131.24	
	N°3.c	300	743.00	

Tableau 3.5 : correspondance entre l'étendue et la valeur moyenne de la microdureté de quelques séries caractéristiques.

Généralement, plus le minéral est dur et plus la série des mesures est étendue, indépendamment de sa nature minéralogique. Comme nous l'avons remarqué dans le paragraphe 3.2.2.5.2., l'expression de la microdureté Vickers étant hyperbolique, plus l'empreinte est petite, c'est-à-dire plus le minéral testé est dur, et plus les conséquences d'une imprécision de lecture sont importantes.

Lorsque la dureté moyenne est faible par rapport à l'étendue de la série, cela peut signifier que le domaine choisi est hétérogène et donc non caractéristique. C'est le cas de la biotite chloritisée de l'échantillon 237.30 dont les paramètres de positions sont également très dispersés :

- médiane : 93.75 Kg/mm²
- moyenne : 159.50 Kg/mm²
- modes : 62.50 et 162.50 Kg/mm²

La distribution est bimodale, asymétrique et son étendue est égale à une fois et demi la moyenne.

3.2.3.4. - Résultats des essais de microdureté Vickers - Etude par type de minéraux :

3.2.3.4.1. - Essais réalisés sur les feldspaths potassiques :

Nous traiterons deux "cas-type".

a) Echantillon 513.88 - Minéral N°8 : *Feldspath potassique zoné et rubéfié.*

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.6. Neuf zones indicées alphabétiquement de a) à i) ont été définies. Les valeurs des microduretés des zones les moins altérées (474 à 933 Kg/mm²) sont du même ordre de grandeur que celles qui sont indiquées par B.W.MOTT, pour l'orthose saine (714 à 795 Kg/mm²).

Profondeur (m)	Nature du Minéral	Nbre de mesures	Dureté Vickers (Kg/mm ²)			Hv ₀ (1) d=10 µm Kg/mm ²	n (2)	sx (3) Kg/mm ²	Couleur (code PANTONE)	Aspect de la roche
			Médiane	Moyenne	mode(s)					
12.00	1. biotite	18	135.00	127.89	125.00	---	---	92.05	Process black C	G. rubéfié + alt.météorique
	2. Fr	7	1437.50	1317.28	1250.00	---	---	280.92	Teinte chair 473	
	3. plagiocl. rub.	4	---	352.45	---	---	---	152.75	Teinte chair 472	
34.20	biotite	17	95.00	91.62	20.00	---	---	41.93	Process black C	G. rubéfié + alt.météorique
					100.00					
					160.00					
217.20	1. plagiocl. altéré	45	48.82	50.35	47.50	59.46	1.832	7.39	Vert 586	G. rubéfié + minéraux argileux verts
	2. plagiocl. altéré	9	56.50	55.69	47.50 57.50	47.56	2.156	5.31	Vert 5773	
220.80	1. biotite	11	153.13	153.15	155.00	---	---	25.64	Process black C	Granite rubéfié
	2. biotite alt.	3	---	577.87	---	---	---	99.29	Gris cool gray 10	
	3. chlorite	2	---	35.40	---	---	---	10.12	Vert 4525	
	4. chlorite	2	---	286.62	---	---	---	149.52	Vert 4535	
	5. plagiocl. altéré	3	---	1006.24	---	---	---	239.61	Marron rose 4705	
	6. Fr	2	---	916.70	---	---	---	48.00	Rose pâle 155	
237.30	biotite altérée	16	93.75	159.09	62.50 162.50	---	---	107.32	Process black C	Granite gris à l'aspect sain
301.80	1. biotite	19	70.83	73.25	67.50	88.94	1.801	13.14	Process black C	Granite très rubéfié à minéraux argileux verts
	2.a.plagioclase	6	---	102.93	---	88.35	2.140	6.44	Gris cool gray 10	
	2.b. arcille	6	---	35.47	---	48.44	1.627	5.92	Vert olive 461	
	2.c. oxyde	1	---	34.06	---	---	---	---	Rouge 162	
	2.d. Plagiocl. rub.	7	---	22.13	---	21.99	1.998	2.42	Rose orange 1555	
	3.a. arcille	20	49.44	48.52	50.00	29.59	2.389	10.51	Vert 3995	
	3.b. arcille	20	113.33	131.24	90.00	125.08	1.829	59.35	Vert 458	
	3.c. plagiocl. rub.	20	741.67	743.82	625.00 725.00	746.80	1.955	77.16	Teinte chair 481	
	4.a. plagiocl. rub.	20	78.00	82.19	65.00 95.00 125.00	77.77	2.013	24.50	Teinte chair 479	
	4b1.b2. plagiocl.	9	730.01	690.46	750.00	---	---	209.01	Gris cool gray 10	
	4.c. plagiocl.	19	732.14	729.49	705.00 735.00 720.00	719.79	2.017	88.73	Marron clair 4655	
513.20	1. dolomite	4	---	281.15	---	---	---	162.50	Gris 417	Granite rubéfié + chloritisation des biotites
	2. chlorite	3	---	256.63	---	---	---	63.97	Vert 461	
	3. minéral bleu	2	---	451.28	---	---	---	121.60	Bleu 5487	
	4. minéral bleu	2	---	828.76	---	---	---	123.03	Bleu 5487	
	5. quartz fissure	3	---	590.21	---	---	---	72.41	Gris 428	
	6. plagiocl. rub.	2	---	511.37	---	---	---	118.08	Marron clair 4655	
	7. plagiocl. rub.	1	---	427.87	---	---	---	---	Teinte chair 479	
	8. Fr zoné	5	---	421.33	---	---	---	306.93	Marron clair 4655	

Tableau 3.6 a : Résultats des mesures de dureté Vickers effectuées sur divers échantillons et minéraux.

(1) : microdureté au sein de GRAZ (1981)

(2) : indice de Meyer n

(3) : écart type expérimental

Profondeur (m)	Nature du Minéral	Nbre de mesures	Dureté Vickers (Kg/mm ²)			Hv _{0.05} (1) d=10 µm Kg/mm ²	R (2)	SX (3) Kg/mm ²	Couleur (code PANTONE)	Aspect de la roche
			Médiane	Moyenne	mode(s)					
513.88	1. plagioclase	42	228.95	234.03	225.00	238.34	2.051	54.84	Rose pâle 162	Granite rubéfié + chloritisation des biotites
	2. plagiocl.rub.	45	54.39	52.96	42.50 60.00	56.26	1.915	10.43	Violet 4985	
	3. quartz	25	1135.00	1161.92	1150.00 1325.00	1159.32	2.021	125.59	Gris 431	
	4. biotite chl.	31	184.96	192.38	90.00 170.00 250.00	151.78	2.177	75.99	Vert 448	
	5. biotite	30	137.78	139.15	150.00	141.32	1.949	19.29	Process black C	
	6. microfissure	20	245.00	255.04	225.00	247.29	2.145	48.23	Rose pâle 1355	
	7. muscovite	5	---	251.10	---	252.47	2.152	44.25	Argenté 877	
	8.a.quartz	6	---	1239.93	---	1239.38	2.030	92.68	Gris warm gray 40	
	8.b.FF	6	---	728.58	---	723.11	2.021	59.74	Gris 420	
	8.c.FF	6	---	932.67	---	951.05	2.125	39.16	Rose orange 1555	
	8.d.oxyde	1	---	420.50	---	---	---	---	Rouge 187	
	8.e.arcille	6	---	340.60	---	309.17	1.673	129.93	Vert olive 4535	
	8.f.FF	7	---	777.89	---	774.82	2.014	38.90	Rose orange 155	
	8.g.FF	6	---	472.95	---	349.30	2.831	90.10	Rose orange 1555	
	8.h.oxyde	1	---	113.06	---	---	---	---	Rouge 187	
	8.i.FF	4	---	524.42	---	495.68	2.123	24.61	Gris 420	
553.60	1. biotite	2	---	443.32	---	---	---	72.10	Process black C	Granite rose cataclaté présence de dolomite verte
	2. chlorite	2	---	218.00	---	---	---	65.12	Gris 417	
	3. oxyde	1	---	424.00	---	---	---	---	Rouge 506	
	4. chlorite	4	---	250.97	---	---	---	69.87	Gris 417	
	5. Feldsp.rub.	5	---	560.77	---	---	---	65.85	Teinte chair 473	
555.20	1. biotite chl.	14	266.66	221.64	100.00 325.00	---	---	112.47	Process black C	Granite très rubéfié. Plagio. "rouge sang"
	2. Feldsp.rub.	6	---	700.70	---	---	---	194.10	Teinte chair 475	
556.40	1. biotite	4	---	492.20	---	---	---	166.07	Process black C	Granite gris à l'aspect sain
	2. biotite	2	---	249.28	---	---	---	---	Process black C	
	3. chlorite	3	---	107.46	---	---	---	33.95	Vert 459	
	4. chlorite	1	---	272.46	---	---	---	---	Vert 459	
569.66	1. biotite	25	83.50	84.56	85.00	81.32	2.034	10.57	Process black C	Granite peu rubéfié + amas de biotites
	2. plagioclase	20	302.00	305.17	305.00	300.75	2.061	21.20	Rose orange 1625	
	3.a.FF	9	123.34	105.60	110.00	105.49	2.298	17.92	Marron clair 4685	
	3.b.biotite	9	66.25	66.78	65.00	65.95	2.002	10.21	Vert 5767	
	3.b'alt.biotite	2	---	33.44	---	---	---	---	Gris cool gray 10	
	3.c.FF	8	635.00	639.09	637.50	629.80	2.045	22.81	Marron clair 4685	
	4. plagiocl.rub.	9	625.00	556.51	250.00 700.00 150.00	193.29	3.957	249.83	Marron rose 4715	
581.60	1. biotite	5	---	135.38	---	---	---	98.46	Process black C	Granite gris Rubéfaction au- tour fissures
	2. biotite	3	---	374.53	---	---	---	20.06	Process black C	
	3. FF	2	---	777.46	---	---	---	270.65	Marron clair 1675	

Tableau 3.6 b : Résultats des mesures de dureté Vickers effectuées sur divers échantillons et minéraux.

(1) : microdureté au point de 0.00218561

(2) : indice de Bragg R

(3) : écart type expérimental

Le remplissage argileux a une microdureté beaucoup plus faible : 341 Kg/mm²

Mis à part une valeur élevée pour le domaine c), la zone rubéfiée rose orangé soutenu est moins dure que celle qui n'est pas rubéfiée et localisée près du quartz. Dans la zone i), le feldspath n'est pas rubéfié, mais néanmoins altéré avec Hv = 524 Kg/mm².

b) Echantillon 969.66 - Minéral N°3 : Feldspath potassique zoné altéré non rubéfié.

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.7.

Le feldspath sain de microdureté 639 Kg/mm² se distingue nettement de la zone altérée a), où Hv = 125.80 Kg/mm². La biotite b) se trouvant en inclusions orientées suivant les zonations du feldspath, possède une très faible valeur de microdureté (66.78 Kg/mm²) et contient elle-même des inclusions encore plus tendres (8.30 Kg/mm²).

Sur ces deux exemples, on constate que les microduretés mesurées sur les domaines sains, ont des valeurs proches de celles citées dans la littérature. D'autre part, on note de grandes différences de microdureté Vickers entre les feldspaths potassiques à l'aspect sain et ceux qui sont rubéfiés.

3.2.3.4.2. - Essais réalisés sur les plagioclase rubéfiés :

Nous traiterons trois "cas-type"

a) Echantillon 301.80 - Minéral N°2 : Plagioclase rubéfié.

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.8. Le plagioclase est très altéré et rubéfié par endroit. On note sur le domaine étudié des zones concentriques ayant des microduretés croissantes de façon centrifuge :

Zone	a	b	c
Hv (Kg/mm ²)	102.93	35.47	34.00
Couleur	gris	vert	rouge
	----->		
	périphérie	centre	

Les microduretés mesurées sont très faibles comparées à celles mesurées sur les plagioclases N°3.c et N°4.c qui se trouvent à la même profondeur (301.80 m).

b) Echantillon 301.80 - Minéral N°3 : Plagioclase rubéfié.

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.9. Les zones d'altération peuvent se décomposer en zones concentriques caractérisées par leur couleur et leur microdureté :

Zone	c	b	a
Hv (Kg/mm ²)	743.82	131.24	48.52
Couleur	chair	vert foncé	vert pâle
	----->		
	périphérie	centre	

c) Echantillon 301.80 - Minéral N°4 : Plagioclase rubéfié.

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.10. La répartition des zones d'iso-microdureté en fonction de l'altération est différente de celles déjà rencontrées. La rubéfaction semble progresser de façon centripète en attaquant préférentiellement les angles.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
a - Quartz	Gris "warm gray 4C"	1239.93
b - Feldspath	Gris 420	758.58
c - Feldspath	Rose orangé soutenu 1555	932.67
d - Oxyde	Rouge 187	420.50
e - Remplissage fissural argileux	Vert olive pâle 4535	340.60
f - Feldspath	Rose orangé pâle 155	777.89
g - Feldspath	Rose orangé soutenu 1555	473.95
h - Oxyde	Rouge 187	113.06
i - Feldspath	Gris 420	524.42

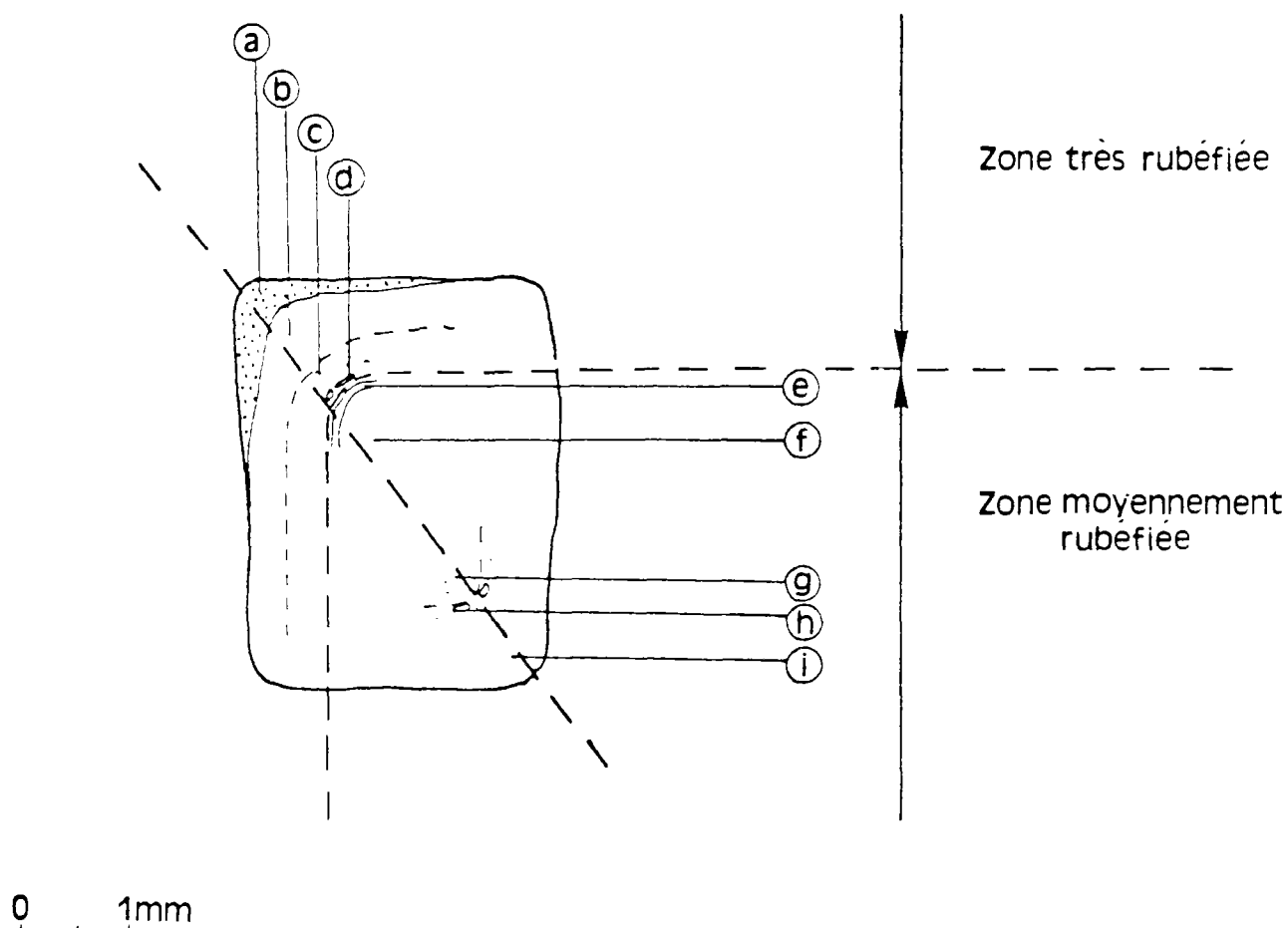


FIG.3.6 : Echantillon 513.88 - Minéral N°8 : feldspath potassique zoné rubéfié. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
a - Feldspath altéré	Marron clair 4685	125.80
b - Biotite	Vert olive 5767	66.78
b bis - produit d'altération dans les clivages de la biotite	Marron clair 4685	8.30
c - Feldspath aspect sain	Marron clair 4685	639.09

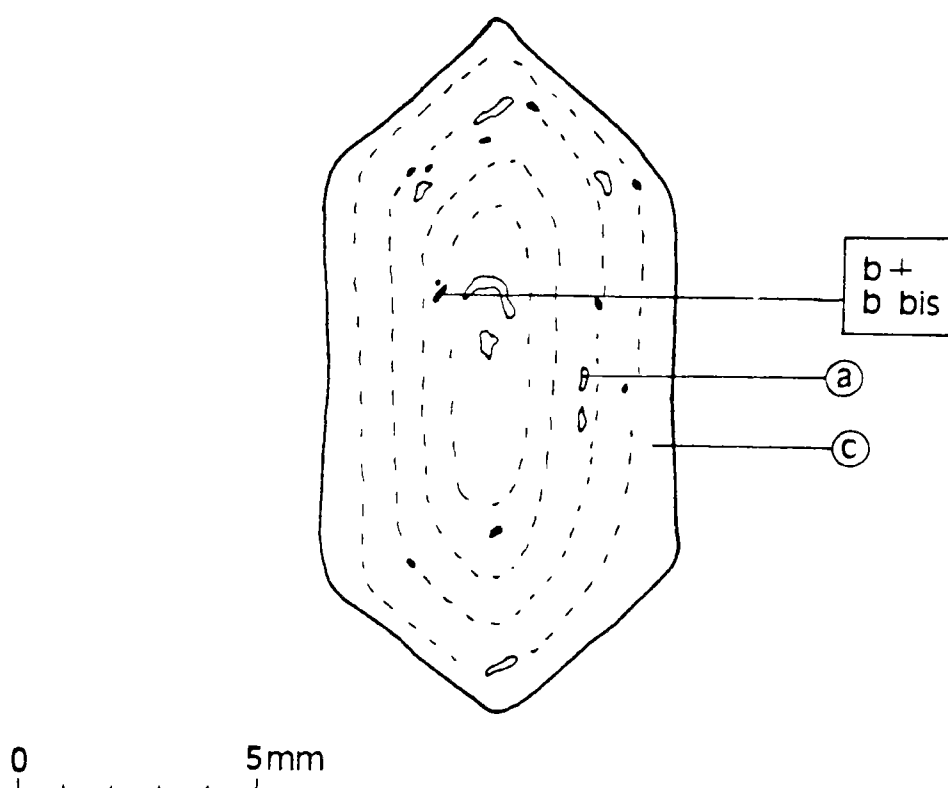
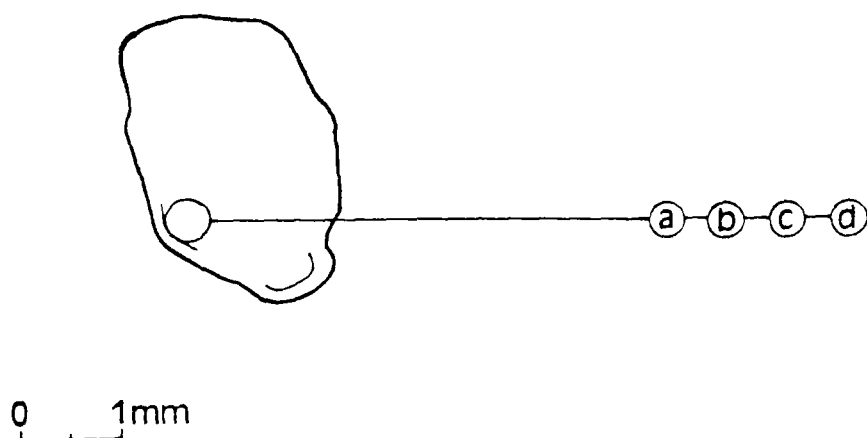
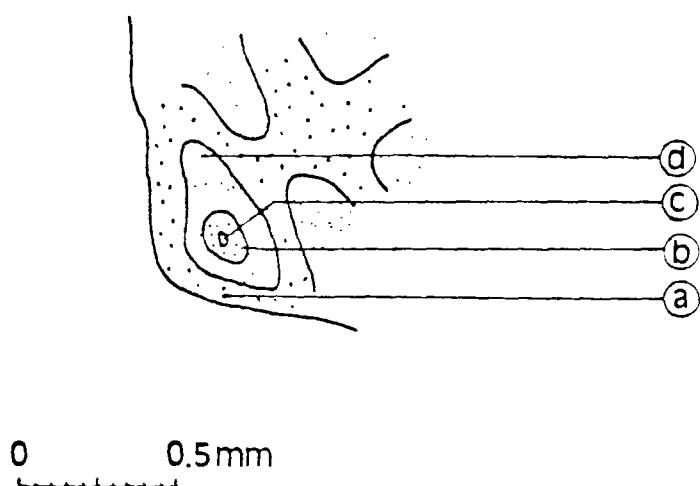


FIG.3.7 : Echantillon 969.66 - Minéral N°3 : feldspath potassique zoné.
Localisation et caractéristiques des zones rubéfiées.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
a - Feldspath	Gris "cool gray 1C"	102.93
b - Produit argileux	Vert olive pâle 461	35.47
c - Oxyde	Rouge 162	34.00
d - Feldspath rubéfié	Rose orangé soutenu 1555	82.13



Vue d'ensemble du minéral N°2



Localisation des zones étudiées

FIG.3.8 : Echantillon 301.80 - Minéral N°2 : plagioclase rubéfié.
Localisation et caractéristiques des zones étudiées.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
a - Produit argileux	Vert olive foncé 3995	48.52
b - Produit argileux	Vert olive pâle 458	131.24
c - Feldspath rubéfié	Teinte chair 481	743.82

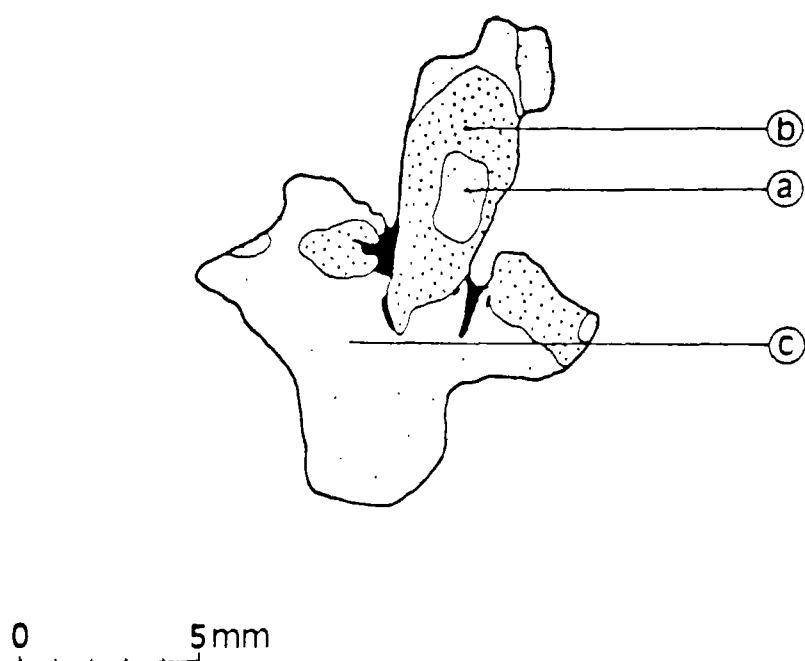


FIG.3.9 : Echantillon 301.80 - Minéral N°3 : plagioclase rubéfié avec présence d'une fraction argileuse verte. Localisation et caractéristiques des zones étudiées.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
a - Plagioclase rubéfié	Teinte chair 479	82.19
b1 + b2 - liséré blanc	Gris "cool gray 1C"	680.46
c - Plagioclase rubéfié	Marron clair 4655	729.49

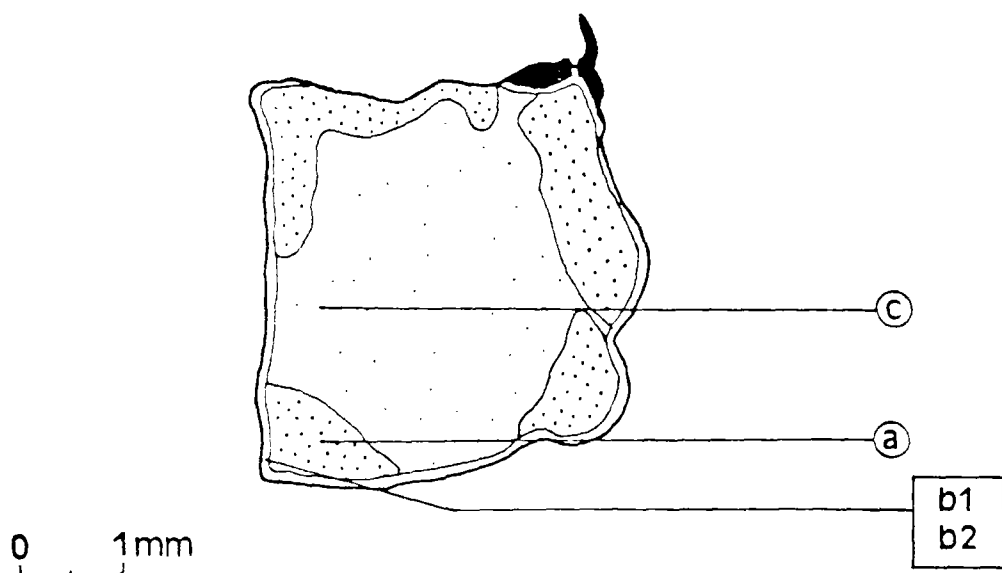


FIG.3.10: Echantillon 301.80 - Minéral N°4 : plagioclase rubéfié.
Localisation et caractéristiques des zones étudiées.

Minéralogie	Couleur	Dureté Vickers moyenne (Kg/mm ²)
1 - Plagioclase rubéfié	Rose pâle orangé 162	52.96
2 - plagioclase rubéfié	Violet carmin 4985	234.03

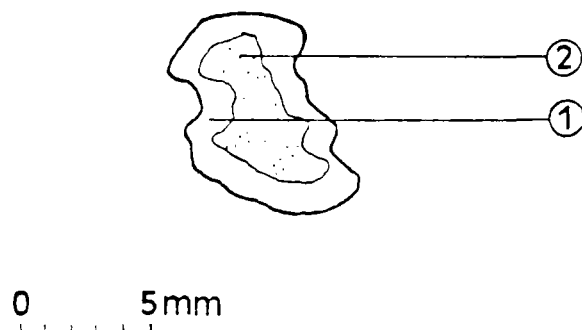


FIG.3.11 : Echantillon 513.88 - Minéraux N°1 & 2 : plagioclase rubéfié.
Localisation et caractéristiques des zones étudiées.

Zone	a	c
Hv (Kg/mm ²)	48.52	743.32
Couleur	chair	marron
	----->	
	périphérie	centre

Le plagioclase est entouré par un liséré de teinte grise (zone b) où Hv = 680 Kg/mm².

d) Echantillon 513.88 - Minéraux N°1 & N°2 : *Plagioclase rubéfié.*

Les domaines testés sont représentés sur la fig.3.11.

La zone rubéfiée violet carmin 4985 se trouvant au centre, est tendre (234 Kg/mm²) et un liséré blanc très altéré (53 Kg/mm²), entoure la zone rubéfiée.

3.2.4. - Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons largement insisté sur les difficultés expérimentales et les problèmes de définition posés par l'essai de microdureté Vickers. En effet, cet essai utilisé à l'origine par les métallurgistes, demande des précautions opératoires encore plus drastiques lorsque l'on étudie des matériaux non métalliques qui ont un comportement similaire à celui du verre (éclats aux angles de l'empreinte). Il permet toutefois de travailler à l'échelle du minéral et de collecter des données chiffrées.

Nous avons montré que les variations de couleur observées sur les minéraux rubéfiés, et notamment les feldspaths, correspondaient à des variations de microdureté. En ce qui concerne les minéraux zonés, on a pu déterminer une gradation radiale centrifuge ou centripète de la microdureté. D'autre part nous avons constaté que les feldspaths potassiques étaient en général plus durs que les plagioclases dont la microdureté peut varier d'un facteur 30 au sein d'un même minéral (échantillon 301.80, minéral N°2, domaines a et b). L'altération hydrothermale déstructurerait plus profondément les feldspaths sodicalciques que les feldspaths sodipotassiques au point de diminuer sensiblement leurs performances mécaniques.

Cependant, il faudrait pousser plus loin l'étude pour tirer des conclusions plus générales.

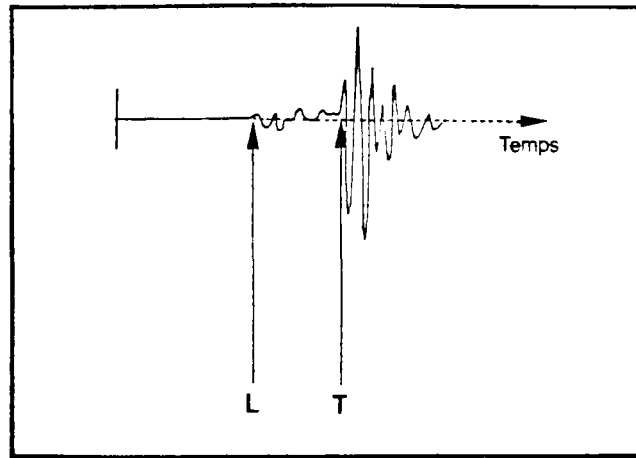
3.3. - Etude mécanique à l'échelle de la roche :

3.3.1. - Etude mécanique des altérations à l'échelle de la roche par l'étude des vitesses de propagation des ondes soniques longitudinales et transversales :

3.3.1.1. - Introduction :

La mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales et transversales permet de définir les principales caractéristiques élastiques de la roche : module d'Young, module de compressibilité, coefficient de Poisson, coefficients de Lamé. Pour les distinguer des résultats obtenus par les essais mécaniques classiques, on parle alors de paramètres "dynamiques".

Les essais ont été réalisés sur 36 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur H = 40 mm, et sur 239 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur H = 20 mm. La mesure de la hauteur des éprouvettes a été faite avec un pied à coulisse précis au 1/25 de mm.



**FIG.3.12 : L : arrivée des ondes longitudinales
T : arrivée des ondes transversales
(d'après P.HAMON & P.MORLIER, 1969)**

En ce qui concerne la détermination de la vitesse de propagation des ondes longitudinales les essais ont été réalisés sur éprouvettes sèches (après passage à l'étuve à 105°C), puis saturées (suivant le mode opératoire classique).

3.3.1.2. - Dispositif expérimental :

La chaîne de mesure est composée des éléments suivants :

- un générateur récepteur PANAMETRICS-SOFRANEL 5052 PX qui émet des impulsions très brèves et permet de travailler par transmission.

- pour la mesure des ondes longitudinales :

- un jeu de capteurs longitudinaux L.C.P.C de fréquence 0.5 MHz.
- un compteur de temps dont la précision de mesure est de $\pm 0.01 \mu s$.

- pour la mesure des ondes transversales :

- un jeu de capteurs PANAMETRICS de fréquence 0.5 MHz.
- un oscilloscope analogique pour mesurer le temps d'arrivée des ondes transversales.

Remarques :

1) le train d'onde transversale est plus ample que celui des ondes longitudinales qui le précède. Cependant, la détermination de son temps d'arrivée est problématique. La fig.3.12 situe sur la courbe de réponse, la position des points de mesures que nous avons adoptés.

2) dans le cas de la détermination de la vitesse de propagation des ondes transversales, R.P.YOUNG et D.A.HUTCHINS (1987) ont constaté que la transmission des ondes était sensiblement améliorée quand le contact entre les capteurs et l'éprouvette était assuré par une goutte de miel. Nous avons adopté leur façon de faire. Cette solution a été préférée à celles proposées par N.KLIMIS (1989) qui emploie des produits permettant une bonne transmission du signal mais qui polluent presque irréversiblement l'échantillon (graisse par exemple).

3.3.1.3. - Formalisme :

Les vitesses longitudinale v_l et transversale v_t sont liées aux coefficients de Lamé par les relations suivantes :

$$\mu = \rho * v_t^2 \quad (3.13)$$

$$\lambda = \rho * (v_l^2 - 2v_t^2) \quad (3.14)$$

Le coefficient de Poisson ν pouvant s'exprimer en fonction des coefficients de Lamé, on en déduit sa formulation en fonction de v_l et v_t :

$$\nu = \frac{\lambda}{2 * (\lambda + \mu)} \quad (3.15)$$

d'où :

$$\nu_{dyn.} = \frac{v_l^2 - 2v_t^2}{2 * (v_l^2 - v_t^2)} \quad (3.16)$$

Les modules d'Young E et de compressibilité Kb peuvent également s'exprimer en fonction de μ et λ , et par suite en fonction de v_t et v_l . On parlera alors de module d'Young dynamique $E_{dyn.}$ et de module compressibilité dynamique $Kb_{dyn.}$:

$$E = \frac{\mu * (3 * \lambda + 2 * \mu)}{\lambda + \mu} \quad (3.17)$$

d'où

$$E_{dyn.} = \rho * \frac{v_t^2 * (3 * v_l^2 - 4 * v_t^2)}{v_l^2 - v_t^2} \quad (3.18)$$

d'autre part

$$Kb = \frac{3 * \lambda + 2 * \mu}{3} \quad (3.19)$$

d'où

$$Kb_{dyn.} = \rho * (v_l^2 - 4/3 * v_t^2) \quad (3.20)$$

3.3.1.4. - Interprétation des résultats :

Prof. (m)	v_l (m/s)	v_t (m/s)	v_l/v_t	$E_{dyn.}$ (GPa)	$K_{dyn.}$ (GPa)	$\gamma_{dyn.}$	μ (GPa)	λ (GPa)	ASPECT DE LA ROCHE
27.40	4208	2747	1.531	43.6	19.6	0.129	19.3	6.7	G.rubéfié, altération météorique
34.20	4103	1497	1.643	38.9	22.0	0.206	16.1	11.3	G.rubéfié, altération météorique
41.90	4497	2890	1.556	50.3	23.8	0.148	21.9	9.2	G.rubéfié, altération météorique
105.10	4587	2794	1.642	49.0	27.7	0.205	20.3	14.1	Granite rubéfié
119.65	4448	2923	1.522	50.0	21.8	0.120	22.2	7.0	Granite peu rubéfié
153.35	4277	2516	1.700	40.0	25.2	0.235	16.2	14.4	Granite rubéfié
160.05	4728	3150	1.501	56.8	23.8	0.101	25.8	6.5	G.cataclaté gris à texture fine
220.80	4451	2803	1.588	47.5	24.1	0.172	20.3	10.6	Granite rubéfié
233.48	3773	2532	1.490	36.5	14.8	0.090	16.7	3.7	Granite gris G1 à l'aspect sain
262.63	4357	2802	1.555	46.5	22.0	0.147	20.3	8.5	Granite gris G1 à l'aspect sain
272.50	4383	2902	1.510	48.5	20.7	0.110	21.8	6.1	Granite gris G1 à l'aspect sain
301.80	4472	2507	1.784	40.7	29.6	0.271	16.0	18.9	Granite très rubéfié
324.05	3701	2189	1.691	27.7	17.2	0.231	11.3	9.7	G.rubéfié - minéraux argileux
391.53	3925	2458	1.597	36.3	18.8	0.178	15.4	8.5	Granite rubéfié
402.80	4085	2817	1.450	42.9	15.8	0.047	20.5	2.1	Granite rubéfié
469.20	4488	2711	1.656	45.6	26.5	0.213	18.8	13.9	Granite rubéfié
513.88	4653	2789	1.668	49.4	29.3	0.220	20.2	15.8	Granite cataclaté rose
524.10	4758	2673	1.780	46.9	33.9	0.270	18.5	21.6	Granite rubéfié
535.29	4693	3240	1.448	56.9	20.8	0.045	27.3	2.7	Granite rubéfié
617.18	4628	2877	1.609	50.4	26.7	0.185	21.2	12.5	Granite rubéfié
643.73	4763	2919	1.632	53.2	29.5	0.199	22.2	14.7	Granite rubéfié cataclaté
682.55	4501	2788	1.614	48.0	25.7	0.189	20.2	12.2	Remplissage de fracture (silice)
699.12	5587	3367	1.659	73.0	42.7	0.215	30.1	22.6	Mylonite de couleur sombre
730.30	4785	2817	1.699	50.9	32.0	0.235	20.6	18.2	Granite rubéfié
758.73	4784	3131	1.528	57.0	25.4	0.125	25.3	8.5	G.rubéfié, fissures colmatées
770.50	4574	2799	1.634	48.5	27.0	0.201	20.2	13.5	Granite rubéfié
784.20	4845	2897	1.673	53.0	31.8	0.222	21.7	17.3	Granite rubéfié
825.84	4844	3015	1.606	56.0	29.5	0.184	23.6	13.7	Granite rubéfié
854.63	5011	3115	1.609	59.8	31.7	0.185	25.2	14.9	Mylonite rouge
866.00	4798	2628	1.826	47.3	36.8	0.286	18.4	24.5	Granite gris G2 à l'aspect sain
886.03	4975	3085	1.613	59.8	31.9	0.188	25.2	15.1	Granite gris G2 à l'aspect sain
932.85	4745	3093	1.534	57.2	25.8	0.130	25.3	8.9	Granite rubéfié
966.40	3902	2431	1.605	36.9	19.4	0.183	15.6	9.0	Granite gris G2 à l'aspect sain
969.66	4281	2804	1.527	47.1	20.9	0.124	21.0	6.9	Enclave de biotite
976.60	4553	3158	1.442	54.4	19.6	0.036	26.3	2.1	Mylonite rouge
981.60	4641	2355	1.971	39.0	37.5	0.327	14.7	27.7	Granite gris G2 à l'aspect sain

Tableau 3.7 : Caractéristiques mécaniques du granite d'Auriat déterminées d'après les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales mesurées sur 36 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm. Relation avec les altérations.

Nous ne traiterons dans ce paragraphe que les résultats obtenus sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm. La totalité des résultats figure dans le tableau 3.7.

L'examen des v_l montre que les mylonites et le granite cataclaté se distinguent par des vitesses relativement élevées ($v_{l,myl} = 4880$ m/s, $v_{l,cat} = 4653$ m/s, $v_{l,myl} = 5587$ m/s) par rapport au granite gris à l'aspect sain ($v_{l,gris} = 4400$ m/s, $v_{l,gris} = 3773$ m/s, $v_{l,gris} = 4975$ m/s).

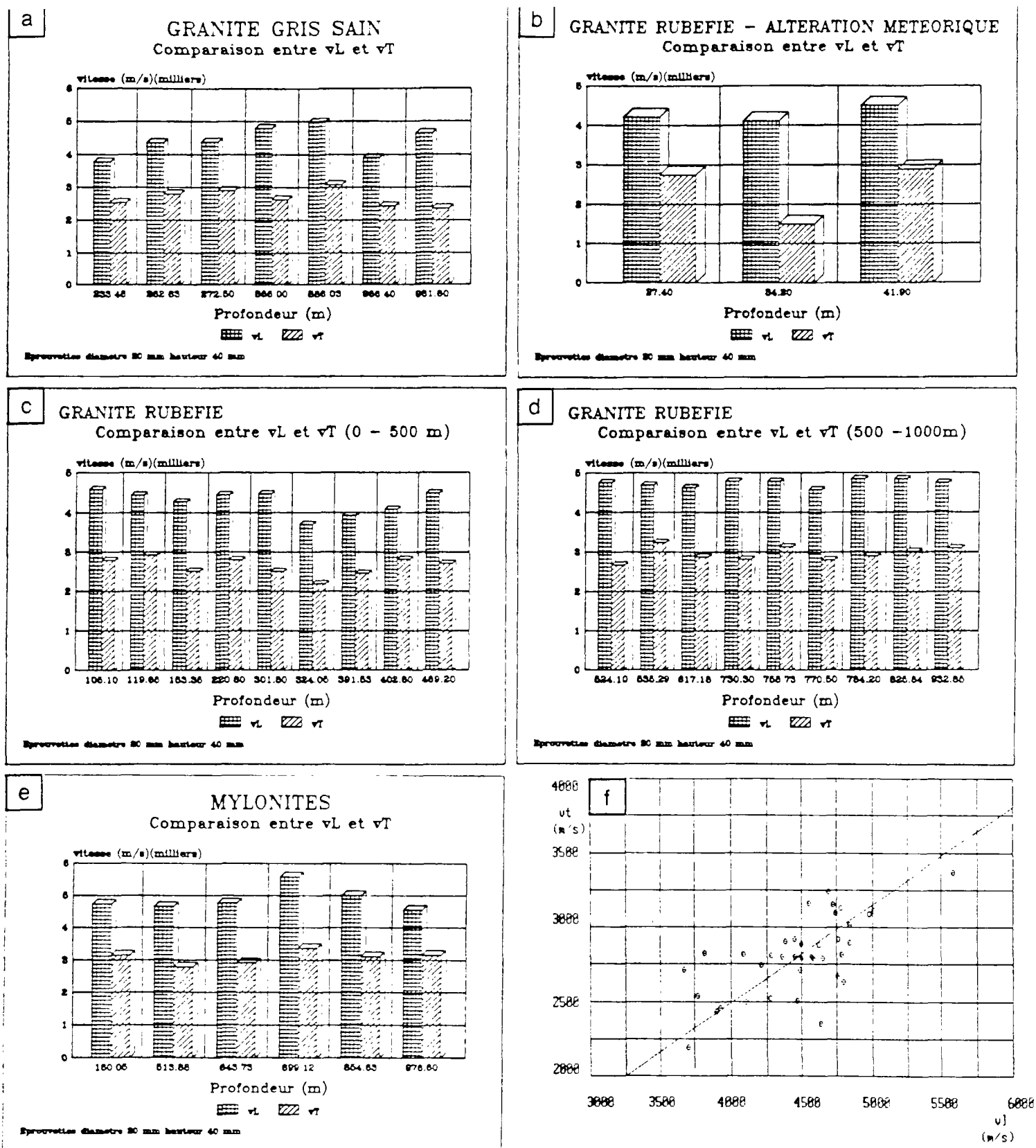


FIG.3.13 : a), b), c), d), e) : comparaison entre les vitesses des ondes longitudinales et transversales en fonction des faciès d'altération.
f) : relation entre les vitesses longitudinales et transversales, tous faciès d'altération confondus.

L'interprétation des valeurs de v_i sera plus amplement développée dans le chapitre -4- où nous introduirons la notion d'indice de qualité.

Compte tenu des incertitudes relatives aux mesures de v_i , il serait présomptueux de tirer des conclusions définitives quant aux valeurs calculées de E , ν , μ et λ . Ces valeurs sont données à titre indicatif.

Une représentation graphique de v_i et v_r en fonction des faciès d'altération du granite d'Auriat est proposée fig.3.13.a, 3.13.b, 3.13.c., 3.13.d et 3.13.e. La fig.3.13.f représente dans un même repère cartésien v_i en fonction de v_r de tous les échantillons étudiés.

3.3.1.5. - Conclusion :

Les caractéristiques élastiques dynamiques que nous avons déterminées laissent à penser que le granite d'Auriat ne devrait pas poser de problèmes mécaniques majeurs et cela quelque soit son type d'altération, du moins à température ordinaire.

3.3.2. - Résistance à la compression simple :

3.3.2.1. - Introduction :

Les essais de résistance à la compression simple ont été réalisés sur 24 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.

Cet essai destructif constitue la dernière étape dans la chaîne de traitement que l'on s'est proposé de faire subir aux éprouvettes de granite (ce qui explique la défection de quelques échantillons).

Nous avons utilisé une presse hydraulique manuelle de 60 KN "labotest 1803" équipée d'un cadencemètre permettant de faire monter le piston à 1.27 mm/mn.

3.3.2.2. - Interprétation des résultats :

La totalité des résultats figure dans le tableau 3.8. En ce qui concerne le granite gris à l'aspect sain, malgré le très faible nombre de mesures, les résistances à la compression obtenues sont comparables à celles déterminées sur le même granite par le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique (1984) :

- 130 MPa en moyenne pour nos mesures (tous faciès d'altération confondus).
- 150 MPa pour celles du L.M.S qui ont été mesurées sur des échantillon de diamètre $\phi = 36$ mm et de hauteur $H = 80$ mm (granite gris G1 à l'aspect sain).

Le tableau 3.9. rassemble quelques résistances à la compression mesurées sur des granites d'origines diverses.

En ce qui concerne les échantillon de type mylonite, si l'on élimine les valeurs relatives aux échantillons fragilisés, $R_{c,111} = 168$ MPa, avec un maximum à 197.4 MPa pour l'échantillon 699.12.

Comparativement, les échantillons rubéfiés sont beaucoup moins performants avec $R_{c,111} = 98$ MPa ($R_{c,11} = 54.1$ MPa, $R_{c,12} = 150.2$ MPa), mais se placent au même niveau de résistance à la compression que le granite du tunnel du Mont Blanc (cf. tableau 3.9). Cependant, ces comparaisons ne tiennent pas compte de l'effet d'échelle éventuel due aux dimensions des échantillons (R.HOUPERT, 1969) dont les résistances à la compression simple sont rassemblées dans le tableau 2.9.

La fig.3.14 représente les résistances à la compression simple que nous avons obtenues sur le granite d'Auriat en fonction des faciès d'altération.

Profondeur (m)	Rc (MPa)	ASPECT DE LA ROCHE
153.85	89.1	Granite rubéfié
196.45	70.0	Granite rubéfié
272.50	111.4	Granite gris G1 aspect sain
301.80	70.7	Granite très rubéfié
391.53	54.1	Granite rubéfié
513.88	75.1	Granite cataclasé rose fissuré 60°
524.10	79.6	Granite rubéfié
535.29	135.6	Granite rubéfié
617.18	108.2	Granite rubéfié
643.73	162.0	Granite rubéfié cataclasé
682.55	89.1	Remplissage de fracture (silice)
699.12	197.4	Mylonite de couleur sombre
730.30	87.9	Granite rubéfié
758.73	73.8	Granite rubéfié à fissures colmatées
770.50	27.4	Granite rubéfié à fissures subverticales
784.20	42.2	Granite rubéfié à fissures subverticales
825.84	142.6	Granite rubéfié
854.63	54.1	Mylonite rouge fissurée 60°
866.00	116.5	Granite gris G2 aspect sain
886.03	164.2	Granite gris G2 aspect sain
932.85	150.2	Granite rubéfié
969.66	98.4	Enclave de biotite
976.60	143.2	Mylonite rouge
981.60	126.7	Granite gris G2 aspect sain

Tableau 3.8 : Résistances à la compression simple Rc mesurées sur 24 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur H = 40 mm.

ORIGINE DES GRANITES	Rc (MPa)
Ploudalmezeau	50
Protodine du Mont Blanc	
Aiguille du Midi	80
Tunnel	100
Perspoder	120
Auriat	150
Senone	190
La Forge	220

Tableau 3.9 : Résistances à la compression simple de quelques granites (d'après J.BERGUES, J.P.CHARPENTIER, P.HABIB, 1994).

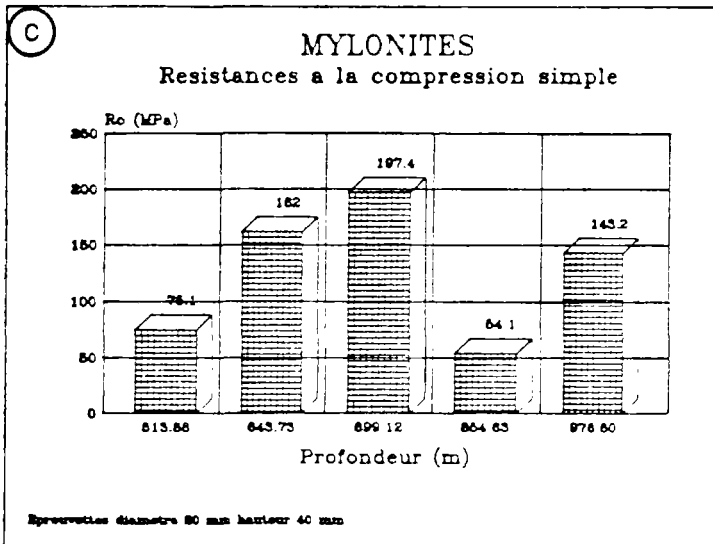
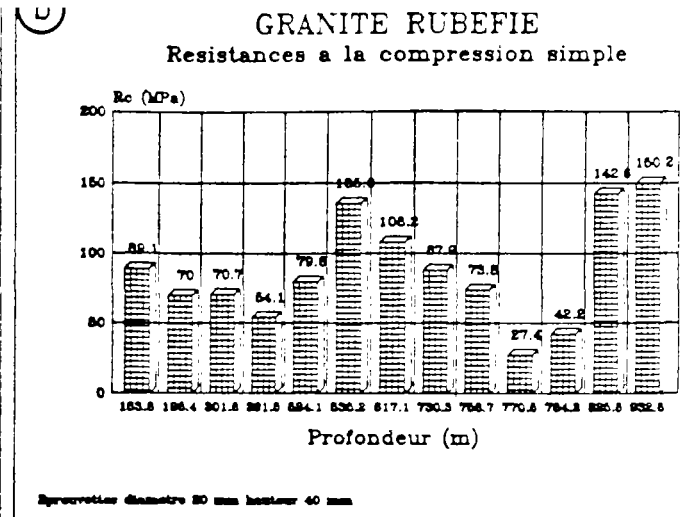
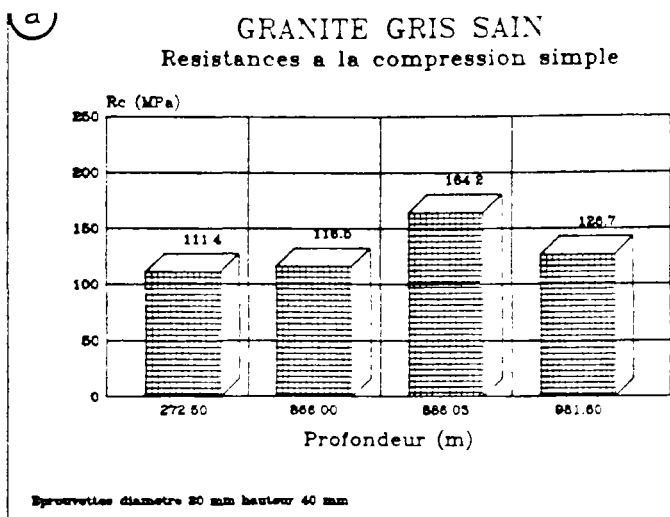


FIG.3.14

Valeurs de la résistance à la compression simple R_c , en fonction des faciès d'altération.

3.3.2.3. - Conclusion :

La résistance moyenne à la compression simple des zones considérées comme saine est correcte. Nos résultats vont dans le même sens que ceux du L.M.S. Cependant, nous pensons qu'une étude mécanique supplémentaire tenant compte des effets de la température serait intéressante à réaliser dans les zones rubéfiées profondes.

3.4. - Conclusion du chapitre 3 :

A l'échelle du minéral, la caractérisation mécanique des altérations dans la masse du granite d'Auriat, a permis de montrer que les feldspaths potassiques étaient moins sensibles à l'altération hydrothermale que les plagioclases. Dans les zones très rubéfiées, ces derniers ont des microduretés Vickers qui peuvent être très faibles (de l'ordre de la dizaine de Kg/mm²). D'autre part, on a constaté que dans certains cas les plagioclases étaient plus déstabilisés au coeur qu'à la périphérie alors qu'ailleurs on observait le phénomène inverse.

A l'échelle macroscopique, le granite d'Auriat possède des caractéristiques mécaniques acceptables d'un point de vue géotechnique et cela quelque soit le type d'altération considéré.

- DEUXIEME PARTIE -

ETUDE DE L'ESPACE POREUX
DU
GRANITE D'AURIAT

- CHAPITRE 4 -

PREMIERE APPROCHE DE L'ESPACE POREUX DU GRANITE D'AURIAT PAR LA DETERMINATION DE LA POROSITE TOTALE.

4.1. - Introduction :

On se propose dans la deuxième partie de notre étude de caractériser le milieu poreux du granite d'Auriat. Les étapes principales de cette analyse sont les suivantes :

- définition du volume poreux par la mesure de la porosité globale à l'eau ;
- détermination des familles de porosité par porosimétrie au mercure ;
- mesure de la perméabilité avec la cellule Hassler ;
- calcul des surfaces spécifiques.

La détermination de la porosité globale à l'eau du granite d'Auriat en fonction de son état d'altération fait l'objet de ce chapitre.

4.2. - Mesure des porosités totales par saturation à l'eau :

4.2.1. - Introduction :

4.2.1.1. - Buts et intérêt de la détermination des porosités totales :

La porosité à l'eau est un renseignement important sur l'état de la roche. Une connaissance précise du volume poreux est un préambule indispensable à l'étude porosimétrique qui doit logiquement en découler.

Ce paramètre, de conception simple, n'en reste pas moins de détermination délicate. En effet, dans le cas de matériaux *a priori* très peu poreux, les erreurs expérimentales prennent une grande importance. Nous faisons dans ce chapitre la revue des méthodes de mesure classiques puis développons une technique plus particulièrement adaptée aux granites.

Nous nous sommes efforcé, pour chacune des méthodes envisagées, d'effectuer les essais sur deux séries d'éprouvettes de dimensions différentes. Etant limités par le volume de matériau disponible, nous avons cherché à déterminer quel était le volume minimum de granite représentatif pour ce type d'essai. L'essai de porosité à l'eau étant non-destructif, nous avons réutilisé pour chaque essai les mêmes éprouvettes (42 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm, 230 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm).

Une fois déterminée la méthode de mesure la plus adaptée aux granites ainsi que la taille optimale des échantillons, nous décomposons la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures, en introduisant les vitesses de propagation des ondes soniques longitudinales. Chaque fois que cela est possible, on cherche à trouver les liens éventuels qui existent entre la porosité et les altérations du granite.

Définition :

La porosité totale s'exprime par la relation :

$$n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} * 100 \quad ; \quad n(\%) : \text{porosité (sans dimension)} \quad (4.1)$$

4.2.1.2. - Méthodologie de la mesure de la porosité à l'eau :

Les mesures réalisées sur les 42 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm ainsi que sur les 230 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm sont représentatives de 40 faciès de profondeurs distinctes.

La mesure de la porosité est généralement considérée comme un essai de routine parfaitement rodé. Cependant, la détermination de la porosité des matériaux très peu poreux (de 0 à 4%) pose de grosses difficultés. En effet, le poids humide de l'échantillon saturé, qui est une des données nécessaires à la détermination, est très difficile à évaluer précisément quand le volume de la pellicule d'eau superficielle est du même ordre de grandeur que celui de l'eau remplissant l'espace poreux.

Nous avons essayé d'une part, d'améliorer la méthode de mesure classique, et d'autre part, de mettre au point une autre méthode de mesure plus adaptée aux matériaux très peu poreux.

4.2.2. - Revue des principales méthodes de détermination de la porosité totale :

4.2.2.1. - Conventions de notation :

ρ_{eau} : poids volumique de l'eau (g/cm³)

P_{hum} : poids humide (g). *Technique de mesure : l'échantillon est saturé d'eau, puis essuyé à l'aide d'un tissu humide avant d'être pesé.*

P_{hum} : poids humide (g). *Technique de mesure : on sature l'échantillon, puis on détermine son poids humide à partir des courbes de séchage.*

P_s : poids sec (g).

P_{hyd} : poids hydrostatique (g). (c'est le poids sec moins la poussée d'Archimède correspondant au volume du squelette de l'échantillon).

V_{t} : volume total de l'échantillon (cm³) = $(P_{\text{hum}} - P_{\text{hyd}}) / \rho_{\text{eau}}$

V_{t} : volume total de l'échantillon (cm³) = $(P_{\text{hum}} - P_{\text{hyd}}) / \rho_{\text{eau}}$

V_{t} : volume total de l'échantillon mesuré au pied à coulisse (cm³).

V_{t} : volume total de l'échantillon mesuré au volumètre à mercure (cm³).

v_{long} : vitesses des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon sec (m/s).

v_{long} : vitesses des ondes soniques longitudinales dans l'échantillon saturé (m/s).

$$V_{\text{air}} = 1485 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{eau}} = 330 \text{ m/s}$$

4.2.2.2. Liste des méthodes - formalisme :

Nous avons recensé 9 méthodes de détermination de la porosité totale :

a) Méthodes nécessitant les mesures du poids sec P_s et du poids hydrostatique P_{hyd} , le poids humide P_{hum} étant déterminé à partir des courbes de séchage (2) ou après essuyage avec une étoffe humide (1).

$$n = \frac{P_{hum} - P_{sec}}{\rho_{eau} * V_t} \quad \left[\begin{array}{l} \frac{P_{hum1} - P_{sec}}{V_{t1} * \rho_{eau}} \quad (4.2) \\ \frac{P_{hum2} - P_{sec}}{V_{t2} * \rho_{eau}} \quad (4.3) \end{array} \right.$$

b) Méthodes nécessitant les mesures du poids sec P_s , du poids humide à partir des courbes de séchage ou après essuyage, et du volume total déterminé au pied à coulisse ou à l'aide du volumètre à mercure.

$$n = \frac{P_{hum} - P_{sec}}{\rho_{eau} * V_t} \quad \left[\begin{array}{l} P_{hum1} \left[\begin{array}{l} \frac{P_{hum1} - P_{sec}}{V_{t3} * \rho_{eau}} \quad (4.4) \\ \frac{P_{hum1} - P_{sec}}{V_{t4} * \rho_{eau}} \quad (4.5) \end{array} \right. \\ P_{hum2} \left[\begin{array}{l} \frac{P_{hum2} - P_{sec}}{V_{t3} * \rho_{eau}} \quad (4.6) \\ \frac{P_{hum2} - P_{sec}}{V_{t4} * \rho_{eau}} \quad (4.7) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

c) Méthodes nécessitant les mesures de P_s , P_{hyd} et du volume total de l'échantillon déterminé soit au pied à coulisse, soit à l'aide du volumètre à mercure.

$$n = \frac{V_{t3} - (P_{sec} - P_{hyd})/\rho_{eau}}{V_{t3}} \quad (4.8)$$

$$n = \frac{V_{t4} - (P_{sec} - P_{hyd})/\rho_{eau}}{V_{t4}} \quad (4.9)$$

d) Méthode nécessitant la connaissance de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales à travers l'échantillon sec (v_{lsec}), puis saturé (v_{lseu}).

$$n = \frac{1/v_{lseu} - 1/v_{lsec}}{1/v_{lseu} - 1/v_{lair}} \quad (4.10)$$

en introduisant les valeurs numériques de v_{air} (1485 m/s) et v_{eau} (330 m/s) on obtient l'expression suivante :

$$n = \frac{1/v_{\text{Lsat}} - 1/v_{\text{Lsec}}}{1/1485 - 1/330} \quad (4.11)$$

4.2.2.3. - Première sélection des méthodes :

MESURE DE LA POROSITE TOTALE (*)										
Technique obtention P_{hum}	ESSUYAGE			SECHAGE			PESEE HYDROSTATIQUE		vit. ondes L	
Profondeur (m)	(1)%	(3)%	(4)%	(2)%	(5)%	(6)%	(7)%	(8)%	(9)%	ASPECT DE LA ROCHE
12.00	1.19	1.18	1.19	1.09	1.09	1.09	1.97	1.39	2.94	Roche pourrie
27.40	1.92	1.90	1.92	2.05	1.65	1.67	2.96	2.07	1.84	G. rubéfié, alt.météo
119.65	0.49	0.49	0.49	0.57	0.47	0.48	1.20	0.75	1.58	G. peu rubéfié
233.48	0.58	0.58	0.58	0.47	0.47	0.47	1.29	0.90	3.55	G gris G1 aspect sain
237.30	0.54	0.54	0.54	0.46	0.46	0.46	1.89	0.99	3.67	G gris G1 aspect sain
262.63	1.20	1.19	1.19	1.05	1.04	1.05	1.87	1.63	1.85	G gris G1 aspect sain
402.80	0.98	0.97	0.98	0.89	0.88	0.88	1.75	1.31	2.34	G. rubéfié
469.20	1.96	1.94	1.96	1.74	1.73	1.74	2.87	2.27	1.03	G. rubéfié
535.29	0.59	0.58	0.59	0.56	0.55	0.56	1.99	0.89	1.59	G. rubéfié
643.73	1.57	1.56	1.56	1.41	1.40	1.41	2.40	1.91	1.07	G. rubéfié cataclasé
730.30	1.24	1.22	1.23	1.20	1.19	1.20	2.45	1.60	1.14	G. rubéfié
825.84	0.96	0.95	0.96	0.88	0.88	0.88	1.78	1.28	1.11	G. rubéfié
854.63	0.76	0.75	0.76	0.66	0.66	0.66	1.79	1.07	0.89	Mylonite rouge
866.00	0.63	0.63	0.63	0.56	0.56	0.56	1.49	0.94	2.11	G gris G2 aspect sain
966.40	0.79	0.78	0.79	0.70	0.69	0.70	2.12	1.13	3.01	G gris G2 aspect sain
981.60	0.87	0.86	0.87	0.68	0.68	0.68	1.39	1.21	1.55	G gris G2 aspect sain

Tableau 4.1 : Comparaison des porosités totales mesurées suivant 9 méthodes différentes (1) à (9) décrites dans le paragraphe 4.2.2.1. On distingue 2 familles de valeurs correspondant chacune au poids humide considéré :

* en gras : le poids humide est obtenu par essuyage (P_{hum1}).

* en italiques : le poids humide est déterminé à partir des courbes de séchage (P_{hum2})

(*) Rappel des différentes méthodes (les conventions de notation sont explicitées dans le paragraphe 4.2.2.1.) :

Méthode (4.1) : $n = (P_{\text{hum1}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t1} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.2) : $n = (P_{\text{hum2}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t2} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.3) : $n = (P_{\text{hum1}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t3} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.4) : $n = (P_{\text{hum1}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t4} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.5) : $n = (P_{\text{hum2}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t3} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.6) : $n = (P_{\text{hum2}} - P_{\text{sec}}) / (V_{t4} * \rho_{\text{eau}})$

Méthode (4.7) : $n = (V_{t3} - (P_{\text{sec}} - P_{\text{hyd.}}) / \rho_{\text{eau}}) / V_{t3}$

Méthode (4.8) : $n = (V_{t4} - (P_{\text{sec}} - P_{\text{hyd.}}) / \rho_{\text{eau}}) / V_{t4}$

Méthode (4.9) : $n = (1/v_{\text{Lsat}} - 1/v_{\text{Lsec}}) / (1/v_{\text{L eau}} - 1/v_{\text{L air}})$

Nous avons procédé à une première sélection des méthodes de détermination de la porosité totale sur 16 échantillons de diamètre $\phi = 20$ mm et d'éclatement 2 (cf. Tableau 4.1).

Les méthodes (7) et (8) ont été éliminées d'emblée. En effet, de la présence au numérateur du volume total V_t découle qu'une petite erreur sur la détermination du volume total de l'échantillon peut entraîner une grande erreur sur le résultat final.

La méthode (9) qui prend en compte la vitesse de propagation des ondes L, est un moyen de détermination indirecte de la porosité totale. Les résultats obtenus par cette méthode, quoique discutables, méritent tout de même d'être comparés à ceux obtenus par ailleurs.

Profondeur (m)	VOLUMES TOTAUX (cm ³)				ASPECT DE LA ROCHE
	V _{t1}	V _{t2}	V _{t3}	V _{t4}	
12.00	12.5359	12.5240	12.6361	12.5613	<i>Roche pourrie rubéfiée</i>
27.40	12.8435	12.8122	12.9822	12.8638	<i>G. rubéfié alt. météo.</i>
119.65	12.5605	12.5588	12.6509	12.5927	<i>G. peu rubéfié</i>
233.48	12.5573	12.5437	12.6481	12.5979	<i>G. gris G1 aspect sain</i>
237.30	12.8503	12.8398	13.0276	12.9082	<i>G. gris G1 aspect sain</i>
262.63	12.5896	12.5711	12.6763	12.6447	<i>G. gris G1 aspect sain</i>
402.80	12.9866	12.9743	13.0888	13.0301	<i>G. rubéfié</i>
469.20	12.7388	12.7113	12.8585	12.7789	<i>G. rubéfié</i>
535.29	12.6818	12.6785	12.8638	12.7202	<i>G. rubéfié</i>
643.73	12.9672	12.9465	13.0777	13.0115	<i>G. rubéfié cataclase</i>
730.30	12.4919	12.4878	12.6479	12.5386	<i>G. rubéfié</i>
825.84	12.5016	12.4920	12.6070	12.5421	<i>G. rubéfié</i>
854.63	12.8301	12.8177	12.9658	12.8704	<i>Mylonite rouge</i>
866.00	12.6990	12.6903	12.8098	12.7386	<i>G. gris G2 aspect sain</i>
966.40	12.6308	12.6196	12.8035	12.6736	<i>G. gris G2 aspect sain</i>
981.60	12.6313	12.5984	12.6890	12.6648	<i>G. gris G2 aspect sain</i>

Tableau 4.2 : comparaison des mesures des volumes totaux.

V_{t1} : $(P_{hum1} - P_{hyd.}) / \rho_{eau}$ avec P_{hum1} déterminé après séchage avec une étoffe humide.

V_{t2} : $(P_{hum2} - P_{hyd.}) / \rho_{eau}$ avec P_{hum2} tiré de courbes de séchage.

V_{t3} : Volume total de l'échantillon mesuré au pied à coulisse.

V_{t4} : Volume total de l'échantillon mesuré au volumètre à mercure.

L'examen du tableau 4.1 permet de faire les observations suivantes :

- Pour un même échantillon, on obtient des valeurs comparables de porosité lorsque l'on utilise le même poids humide dans les calculs. Ainsi, pour un même échantillon, les méthodes (2),(5) et (6) donneront des valeurs de porosité très proches qui ne diffèrent entre elles, dans le pire des cas, que de 1 %. On peut faire la même remarque pour les méthodes (1),(3) et (4). Par contre les différences obtenues entre ces deux familles de résultats varient de 2 % dans le meilleur des cas à 25 % dans le pire des cas.

- Suite aux remarques précédentes, on peut penser que les erreurs sur la valeur du volume total de l'échantillon, ont moins d'influence sur la porosité que celles sur le poids humide à condition que le volume total n'intervienne pas au numérateur.

Le volume total de chaque échantillon a été déterminé par trois méthodes distinctes :

- * V_{t1} : mesure au pied à coulisse (les mesures sont précises à $\pm 1/25$ de mm)
- * V_{t2} : mesure au volumètre à mercure.
- * V_{t3} : mesure par pesée hydrostatique Dans ce cas, il s'agit d'une mesure indirecte où intervient aussi le poids humide :

$$V_{t1} = (P_{hum1} - P_{hyd.}) / \rho_{eau} \quad ; \quad P_{hum1} \text{ déterminé après séchage avec une étoffe humide.} \quad (4.12)$$

$$V_{t2} = (P_{hum2} - P_{hyd.}) / \rho_{eau} \quad ; \quad P_{hum2} \text{ tiré des courbes de séchage.} \quad (4.13)$$

Les résultats numériques figurent dans le tableau 4.2.

Nous avons affiné la technique des pesées hydrostatiques pour tenir compte à la fois du faible volume des éprouvettes (environ 12 cm³) ainsi que de la grande sensibilité de la balance utilisée (précision : 1/10 de mg). Le dispositif employé est détaillé fig.4.1. L'originalité du dispositif expérimental tient en deux points :

- diminution de l'influence des perturbations extérieures : le système de mesure est totalement isolé. On minimise ainsi l'influence perturbatrice des courants d'air ;
- plus grande précision du tarage du support de l'échantillon.

Suivant la méthode de mesure employée, on aura tendance à estimer le volume total de l'échantillon soit par excès, soit par défaut. A partir du tableau 4.2, nous pouvons classer ces méthodes de détermination du volume total, par leur tendance à donner, pour un même échantillon, des volumes mesurés de plus en plus importants :

$$V_{t2} < V_{t1} < V_{t4} < V_{t3} \quad (4.14)$$

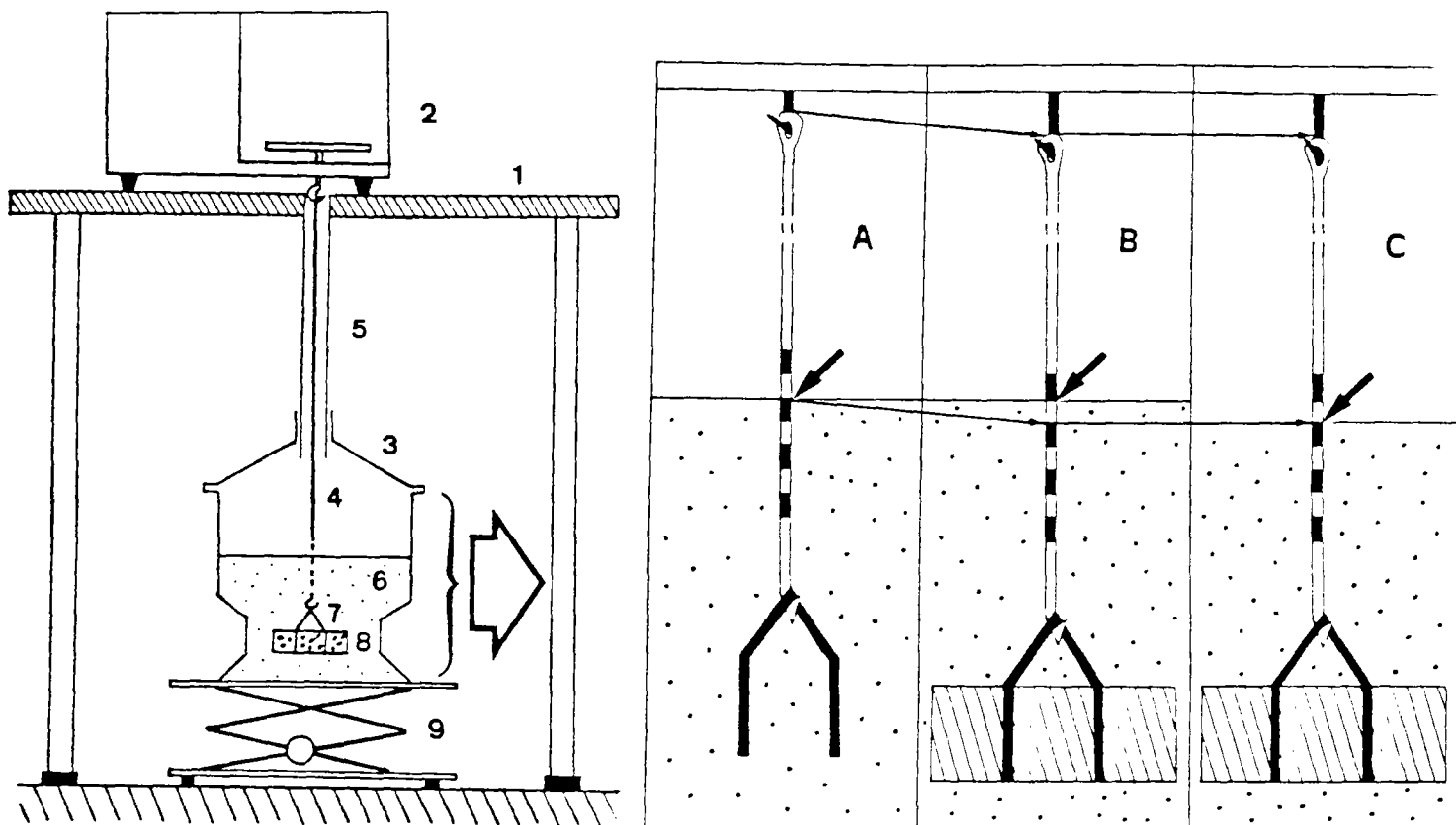
Les volumes totaux obtenus par pesée hydrostatique sont les plus faibles et probablement les plus représentatifs de la réalité.

A l'opposé, la méthode de détermination du volume total d'après les mesures effectuées au pied à coulisse, englobe non seulement l'espace poreux mais aussi les aspérités de surface. Dans ce cas, le volume total est estimé par excès.

Le volumètre à mercure délivre des résultats intermédiaires, le mercure n'épousant pas parfaitement la surface extérieure de l'échantillon, dans le cas d'irrégularités très fines.

Cependant, si l'on considère la faible influence des imprécisions du volume total sur la valeur finale de la porosité, on peut choisir la méthode la plus facile et la plus rapide à mettre en oeuvre, c'est à dire celle où la mesure du volume total de l'échantillon est réalisée avec un pied à coulisse, mais si et seulement si V_t n'intervient pas au numérateur dans le calcul de la porosité n .

En conclusion de cette première sélection, on retiendra que la précision de la mesure de la porosité totale de l'échantillon est liée à celle du poids humide. La précision de la mesure au pied à coulisse du volume total de l'échantillon étant suffisante, on peut retenir les méthodes (3), (5) et (9).



- 1 : table
- 2 : balance précise au 1/10 de mg
- 3 : cloche en verre
- 4 : tige graduée reliant le crochet de la balance au support de l'éprouvette
- 5 : tube en plastique transparent
- 6 : eau
- 7 : support de l'éprouvette
- 8 : éprouvette
- 9 : support élévateur "BOY"

- A : Le support de l'éprouvette est accroché à la tige graduée. En agissant sur le support élévateur, on ajuste le repère choisi sur la tige avec la surface libre de l'eau. Quand l'ensemble est immobile, on tare la balance.
- B : L'échantillon est mis en place. Le crochet de la balance est en position basse : le repère est immergé.
- C : Le repère est réajusté au niveau de la surface libre de l'eau en agissant sur le support élévateur

Fig.4.1 : Technique de mesure du poids hydrostatique adaptée aux échantillons de faible volume (de l'ordre de la dizaine de cm^3).

4.2.3. - Détermination de la porosité totale du granite d'Auriat, par mesure du poids humide après essuyage avec une étoffe humide :

4.2.3.1. - Introduction :

Le poids humide s'obtient communément (NF P 18-554 Décembre 1979) en procédant à une imbibition sous vide de l'échantillon, puis en pesant ce dernier après l'avoir préalablement essuyé avec une étoffe humide.

Cette technique présente l'inconvénient de prendre en compte l'eau qui reste en excès à la surface de l'échantillon. D'autre part le résultat est, dans une large mesure, tributaire du "tour de main" de l'opérateur et du degré d'humidification de l'étoffe qui n'est pas codifié. Nous avons réalisé 4 séries de mesures :

- 2 séries effectuées dans les conditions suivantes :

- * l'essuyage de l'éprouvette est effectuée dans les deux cas avec une étoffe humide.

- * chacune des séries a été exécutée par un opérateur différent.

- 1 série où l'étoffe humide a été remplacée par un papier *a priori* très absorbant ("papier hygiénique doux")

- 1 série où l'étoffe humide a été substituée par un papier *a priori* moyennement absorbant ("papier hygiénique dur").

Chaque série de mesure a été effectuée sur 230 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm et sur 42 échantillons de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm.

4.2.3.2. - Mise en oeuvre de l'expérience :

Le détail du mode opératoire se trouve dans l'annexe 3.

Nous pensons cependant qu'il est utile de résumer ce dernier en insistant sur les points délicats et notamment l'ordre des pesées.

1) Mise à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant.

2) Mise sous vide, puis imbibition de l'échantillon avec de l'eau désaturée. On remarque à la fin de cette étape que des fragments de roche se sont déposés au fond de la cloche à vide.

3) Obtention du poids humide : pesée de l'échantillon après l'avoir essuyé soit avec une étoffe humide, soit avec un papier absorbant. Après cette opération, l'échantillon est déposé dans une coupelle individuelle.

4) Obtention du poids sec : mise à l'étuve à 105 °C de l'échantillon dans sa coupelle individuelle, jusqu'à poids constant.

Remarque : si l'on inverse l'ordre des pesées, on obtiendra un poids humide plus faible qu'il n'est en réalité. En effet, si l'on ne prend pas en compte les débris rocheux mentionnés dans le point 2) ci-dessus, on calculera une porosité exagérément forte.

4.2.3.3. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm :

4.2.3.3.1. - Influence de l'opérateur et du degré d'humidité de l'étoffe (cf.fig.4.2) :

Les deux premières colonnes (n1 et n2) du tableau 4.3 montrent l' influence du "tour de main" de l'opérateur.

Le premier opérateur, contrairement au second, a travaillé avec une étoffe peu humide. Cependant la hiérarchie en porosité croissante est globalement respectée pour les deux séries de mesures.

Profondeur (m)	n1 (%)	n2 (%)	n3 (%)	n4 (%)	Aspect de la roche
12.00	241.18	231.30	210.88	231.19	<i>Roche pourrie rubéfiée</i>
27.40	331.90	281.52	352.21	342.41	<i>Granite rubéfié, alt.météo.</i>
34.20	190.88	201.03	200.88	191.19	<i>Granite rubéfié, alt.météo.</i>
41.90	130.67	100.73	120.64	100.68	<i>Granite rubéfié, alt.météo.</i>
105.10	110.64	110.74	110.63	9 0.68	Granite rubéfié
119.65	2 0.49	2 0.57	4 0.50	2 0.54	Granite peu rubéfié
153.35	373.43	373.63	363.34	353.47	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
171.12	271.45	271.46	261.29	251.36	Granite rubéfié
220.80	9 0.61	9 0.71	100.61	8 0.68	Granite rubéfié
233.48	6 0.58	5 0.64	9 0.61	7 0.66	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	4 0.54	7 0.68	8 0.61	5 0.61	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	251.19	241.30	240.98	211.07	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	3 0.52	3 0.60	3 0.47	4 0.57	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	841.90	331.96	331.87	301.94	Granite très rubéfié
324.05	384.92	385.76	375.73	365.87	G.rubéfié à minéraux argileux
391.53	281.51	291.61	291.42	281.50	Granite rubéfié
402.80	200.97	211.17	220.93	201.03	Granite rubéfié
469.20	351.94	342.00	321.85	321.98	Granite rubéfié
513.88	170.80	160.90	180.77	180.89	<u>Granite cataclasé rose</u>
524.10	220.99	221.17	230.96	221.08	Granite rubéfié
535.29	7 0.58	6 0.64	2 0.44	3 0.55	Granite rubéfié
617.18	231.18	251.31	251.13	241.21	Granite rubéfié
643.73	291.56	301.70	281.36	271.47	<u>Granite rubéfié, cataclasé</u>
682.55	301.65	311.71	301.65	291.70	Remplissage de fracture (SiO ₂)
699.12	1 0.27	1 0.34	1 0.24	1 0.27	<u>Mylonite de couleur sombre</u>
730.30	261.22	261.43	271.31	261.38	Granite rubéfié
758.73	362.53	362.29	—	—	Granite marbré, fissures colm.
770.50	321.81	352.12	341.94	332.12	Granite rubéfié
784.20	311.73	321.93	311.81	311.96	Granite rubéfié
825.84	210.95	190.98	160.75	150.84	Granite rubéfié
854.63	150.75	150.88	150.72	130.74	<u>Mylonite rouge</u>
866.00	100.63	130.82	6 0.59	110.73	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	5 0.54	4 0.64	5 0.51	—	Granite gris G2 d'aspect sain
932.85	120.64	120.77	130.66	120.74	Granite rubéfié
966.40	160.78	170.92	190.78	170.86	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	140.73	140.87	140.70	140.77	Amas de biotite
976.60	8 0.60	8 0.68	7 0.60	6 0.62	<u>Mylonite rouge</u>
981.60	180.86	180.96	170.76	160.85	Granite gris G2 d'aspect sain

Tableau 4.3 : Porosités totales où la valeur du poids humide est mesurée après essuyage. Cas des éprouvettes $\phi = 20$ mm, $h = 40$ mm.

Influence du mode d'essuyage.

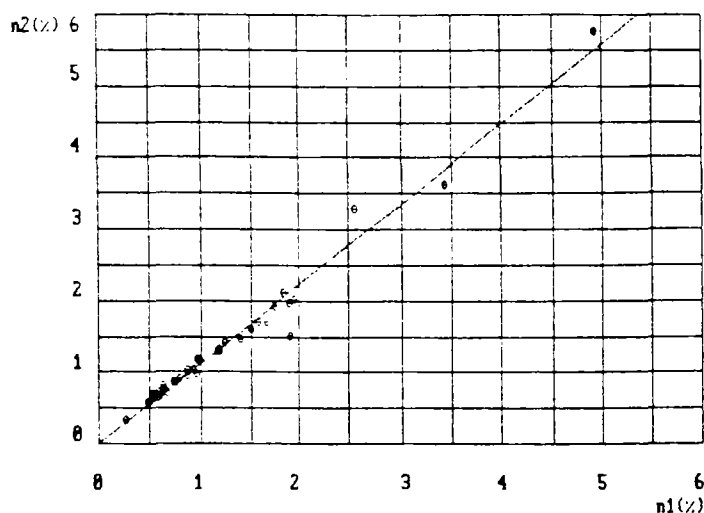
n1 : opérateur 1 - essuyage avec une étoffe humide.

n2 : opérateur 2 - essuyage avec une étoffe humide.

n3 : opérateur 1 - essuyage avec un papier *a priori* très absorbant (papier hygiénique "doux").

n4 : opérateur 1 - essuyage avec un papier *a priori* moyennement absorbant (papier hygiénique "dur").

Les chiffres en exposant et à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec une étoffe humide par deux opérateurs distincts.
Eprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.

FIG.4.2

Le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries de mesures est bon : 0.996. On obtient la droite de régression dont l'équation est la suivante :

$$n2(\%) = 1.12 * n1(\%) \quad (4.15)$$

Le degré d'humidification de l'étoffe utilisée pour essuyer l'échantillon est difficilement quantifiable. Il dépend en fait de chaque opérateur.

4.2.3.3.2. - Influence du type de papier utilisé pour l'essuyage de l'éprouvette saturée en eau(cf.fig.4.3) :

Pour réaliser un essai reproductible, nous avons décidé d'essuyer les éprouvettes avec un papier absorbant. Les essais ont été effectués avec deux qualités de papier :

- un papier *a priori* absorbant (série de mesures n3) : papier hygiénique "doux".
- un papier *a priori* moyennement absorbant (série de mesures n4) : papier hygiénique "dur".

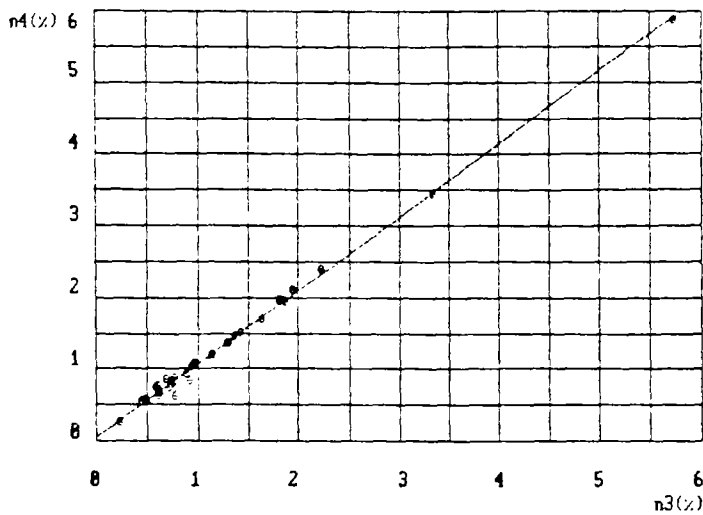
Les résultats obtenus avec les deux papiers sont quasiment identiques. Le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries de mesure n3 et n4 est très bon : $r = 0.9990$. On obtient la droite de régression dont l'équation est la suivante :

$$n4(\%) = 1.00 * n3(\%) \quad (4.16)$$

Les essais effectués avec les papiers ont été réalisés strictement dans les mêmes conditions d'essuyage et par le même opérateur. L'expérience montre donc que si le degré d'humidification de l'instrument utilisé pour l'essuyage est nul, l'essai devient tout à fait reproductible.

Une série de corrélations existe entre les séries de mesures n1, n2, n3 et n4 prises deux à deux (cf.annexe 3). Tous les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.99 ce qui montre que les résultats sont globalement cohérents. Cependant, ceux-ci ne nous permettent pas de privilégier une méthode plutôt qu'une autre.

On est toutefois tenter d'éliminer les méthodes de pesée qui mettent en jeu une étoffe dont le degré d'humidité est difficilement contrôlable. Nous écarterons donc les séries de mesures n1 et n2 et retiendrons les séries n3 et n4 où le poids humide est déterminé après essuyage avec un papier hygiénique sec (mode opératoire en annexe 3).



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec un papier absorbant sec.
 n3 : essuyage avec un papier hygiénique "doux".
 n4 : essuyage avec un papier hygiénique "dur".
 Eprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.

FIG.4.3

4.2.3.4. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur $H = 20$ mm (cf.tableau.4.4) :

4.2.3.4.1. - Influence de l'opérateur et de l'humidité de l'étoffe (cf.fig.4.4) :

Les valeurs de porosité totales qui figurent dans le tableau 4.4 sont des moyennes. Les mesures ont été effectuées sur 230 éprouvettes représentatives de 42 profondeurs. Le détail des résultats se trouve dans l'annexe 4.

Les valeurs de $n1$ sont systématiquement plus fortes que celles de $n2$. Cela indique que le deuxième opérateur a utilisé une étoffe plus humide que le deuxième opérateur. Cependant, la hiérarchie entre les différentes valeurs, dans chaque série, n'est pas toujours respectée. Le coefficient de corrélation linéaire entre les 2 séries (230 points) $n1$ et $n2$ est de 0.978 et l'équation de la droite de régression est la suivante :

$$n2(\%) = 1.01 * n1(\%) - 0.10 \% \quad (4.17)$$

Les résultats sont donc assez dispersés et apparemment largement dépendants de l'humidité de l'étoffe utilisée.

4.2.3.4.2. - Influence du type de papier sec utilisé pour l'essuyage (cf.fig.4.5) :

Les mesures effectuées avec du papier absorbant (séries $n3$ et $n4$) sont très comparables. Il existe une très bonne corrélation entre les deux séries (230 points) $n3$ et $n4$: $r = 0.996$ et la droite de régression a pour équation :

$$n4(\%) = 1.01 * n3(\%) + 0.01 \quad (4.18)$$

Le type de papier hygiénique utilisé pour l'essuyage n'a pratiquement pas d'influence.

Pour les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm (cf. paragraphe 4.2.3.3.2.) comme pour les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm, l'emploi d'un papier sec pour essuyer les échantillons saturés permet de rendre l'essai reproductible.

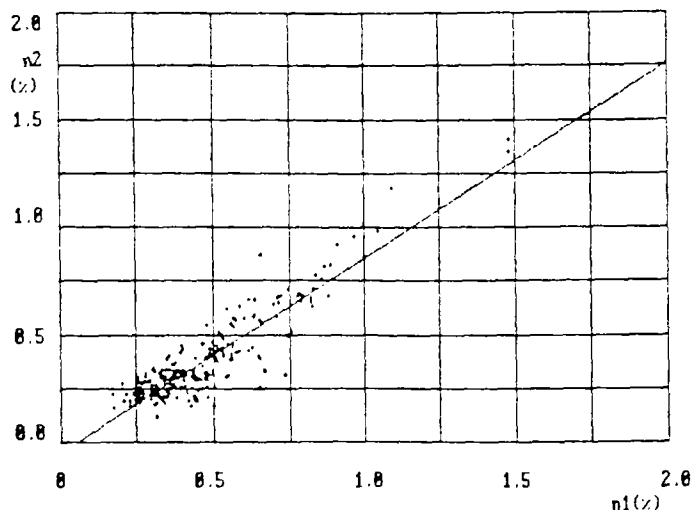
Pour cette raison, nous retiendrons la méthode d'essuyage utilisant du papier sec.

Profondeur (m)	n1(%)	n2(%)	n3(%)	n4(%)	Aspect de la roche
12.00	241.76	201.23	210.21	210.23	Roche pourrie rubéfiée alt.météo
34.20	231.71	231.41	240.25	230.24	Granite rubéfié alt. météorique
27.40	423.52	402.72	410.64	—	Granite rubéfié alt. météorique
41.90	211.16	91.09	100.16	160.20	Granite rubéfié alt. météorique
105.10	51.37	111.10	50.13	40.14	Granite rubéfié
119.65	71.43	30.86	30.12	70.16	Granite peu rubéfié
153.85	312.22	321.87	330.33	330.35	G. rubéfié fissuration colmatée
160.05	161.55	211.26	200.20	150.19	G.gris microgrenu très fracturé
171.12	181.58	251.51	260.26	250.27	Granite rubéfié
196.45	272.00	261.67	270.29	270.31	Granite rubéfié
202.22	191.60	61.01	150.18	190.21	Granite rubéfié
217.20	413.25	423.05	420.66	410.64	Granite rubéfié
220.80	111.49	40.92	60.13	50.14	Granite rubéfié
237.30	91.44	81.06	70.14	20.13	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	342.68	342.29	350.44	370.51	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	81.43	71.05	40.12	60.15	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	392.90	412.80	400.53	400.55	Granite très rubéfié
324.05	435.41	435.26	431.16	471.09	G. rubéfié à minéraux argileux
375.52	251.97	311.86	230.22	240.26	G.gris rose microgrenu
391.53	372.88	372.58	380.52	380.52	Granite rubéfié
402.80	141.51	141.14	160.18	170.20	Granite rubéfié
469.20	382.88	382.66	370.50	360.47	Granite rubéfié
524.10	211.66	121.10	110.17	130.19	Granite rubéfié
535.29	101.48	171.16	120.17	100.18	Granite rubéfié
563.60	282.10	201.79	340.34	340.35	G.cataclasé rose à dolomite
617.18	322.38	281.71	290.30	280.31	Granite rubéfié
643.73	332.39	291.74	280.29	290.31	Granite rubéfié cataclasé
682.55	352.69	352.40	300.30	300.32	Remplissage de fracture (silice)
699.12	31.25	20.83	10.08	10.09	Mylonite de couleur sombre
730.30	261.98	271.68	310.30	310.32	Granite rubéfié
758.73	292.15	331.98	320.30	320.33	G.rubéfié,fissure avec vacuoles
770.50	402.97	392.66	390.52	390.53	Granite rubéfié
784.20	362.70	362.45	360.44	360.44	Granite rubéfié
825.84	302.18	222.29	220.21	220.23	Granite rubéfié
854.63	221.66	241.50	250.25	260.28	Mylonite rouge
866.00	121.49	50.94	80.14	90.17	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	61.39	151.14	90.15	80.16	Granite gris G2 d'aspect sain
932.85	151.54	101.09	130.17	180.20	Granite rubéfié
966.40	171.56	131.11	170.18	200.20	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	201.64	181.16	180.18	110.18	Amas de biotite
976.60	131.49	191.18	140.17	120.18	Mylonite rouge
981.60	41.29	161.14	190.20	140.19	Granite gris G2 d'aspect sain
990.63	11.10	10.78	20.09	30.13	Granite gris peu rubéfié

Tableau 4.4 : Porosités totales où la valeur du poids humide est mesurée aprèsessuyage.Cas des éprouvettes $\phi = 10$ mm, h = 20 mm.

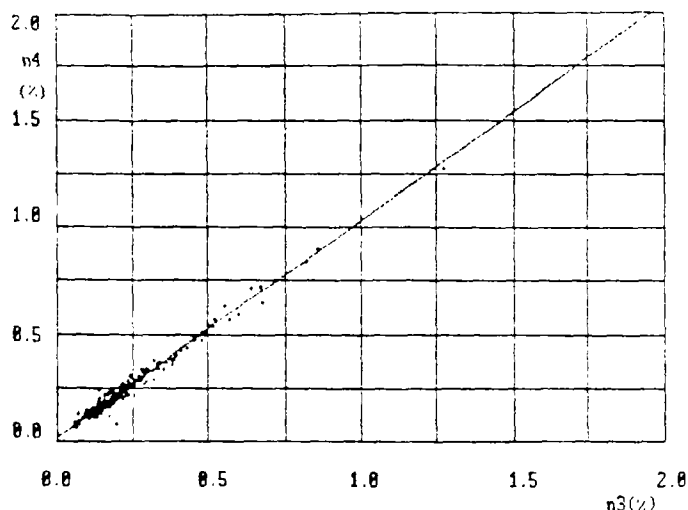
n1 : opérateur 1 - essuyage avec une étoffe humide.
n2 : opérateur 2 - essuyage avec une étoffe humide.
n3 : opérateur 1 - essuyage avec un papier hygiénique "doux".
n4 : opérateur 1 - essuyage avec un papier hygiénique "dur".

Les chiffres à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec une étoffe humide par deux opérateurs distincts.
Eprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur $H = 20$ mm.

FIG.4.4



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé après essuyage avec un papier absorbant sec.
 n_3 : essuyage avec un papier hygiénique "doux".
 n_4 : essuyage avec un papier hygiénique "dur".
Eprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur $H = 20$ mm.

FIG.4.5

4.2.3.5. - Relation entre les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et celle de diamètre $\phi = 10$ mm :

Nous avons essayé de trouver une relation entre les mesures de porosité effectuées dans les mêmes conditions sur les éprouvettes de diamètres $\phi = 20$ mm et $\phi = 10$ mm.

Les résultats sont rapportés dans le tableau 4.5.

Réf. n	Coefficients de corrélation	Equations des droites de régression
$n_{1\phi}$	0.954	$n_{1\phi 10mm} = 1.00 * n_{1\phi 20mm} + 0.84$ (4.19)
$n_{2\phi}$	0.961	$n_{2\phi 10mm} = 0.91 * n_{2\phi 20mm} + 0.45$ (4.20)
$n_{3\phi}$	0.978	$n_{3\phi 10mm} = 0.22 * n_{3\phi 20mm} + 0.03$ (4.21)
$n_{4\phi}$	0.973	$n_{4\phi 10mm} = 0.20 * n_{4\phi 20mm} + 0.05$ (4.22)

Tableau 4.5 : relations entre les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et celles de diamètre $\phi = 10$ mm.

Quand l'éprouvette est essuyée avec du papier absorbant sec, les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm sont nettement plus faibles que celles déterminées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm.

Dans le cas où les échantillons sont essuyés avec une étoffe humide, les porosités sont plus fortes quand il s'agit d'éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm.

Il semble nettement que les résultats les plus homogènes sont obtenus sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm.

4.2.3.6.- Conclusion :

En ce qui concerne les méthodes de détermination de la porosité où le poids humide est déterminé après essuyage, nous pouvons faire 3 remarques :

1) Si l'on utilise une étoffe humide pour essuyer l'échantillon saturé, les résultats varient sensiblement d'un opérateur à l'autre. On peut craindre une dérive des mesures lors d'une même série d'essai dans la mesure où le degré d'humidité de l'étoffe peut varier avec le temps, la température etc.

2) Si l'on utilise un papier absorbant sec pour essuyer l'échantillon saturé, les mesures de porosité sont reproductibles. Bien que par définition le degré d'humidité du papier soit constant, il est nécessaire de codifier très précisément les gestes à accomplir par l'opérateur. Le mode opératoire de cette technique figure dans l'annexe 3.

3) Il apparaît d'ors et déjà que les résultats obtenus avec les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm, sont plus homogènes que ceux obtenus avec les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm. Pour ces dernières, les porosités obtenues par essuyage avec le papier sec, sont étonnamment faibles.

Face aux incertitudes que présentent ces méthodes, nous avons été conduits à envisager le développement d'une méthode de mesure où le séchage de l'échantillon serait obtenu par évaporation contrôlée de la pellicule d'eau recouvrant l'éprouvette et non par essuyage.

En ce qui concerne les relations entre la porosité et les altérations du granite nous pouvons tirer les quelques conclusions encore partielles qui suivent.

Le granite gris sain du faciès G1 est très peu poreux et dans tous les cas possède une porosité inférieure à 1 %. Le faciès mylonitique est le moins poreux. L'échantillon 699.12, qui est une mylonite de couleur sombre, est le moins poreux que nous ayons étudié. Les granites rubéfiés, c'est à dire ceux qui appartiennent au faciès d'altération le plus répandu dans le granite d'Auriat, ont des valeurs de porosité variables comprises entre 0.5 et 6.0 %. Parmi ceux-ci, les échantillons ayant une forte porosité ($n > 2.5$ %) sont en général des échantillons contenant des produits argileux (par exemple l'échantillon 324.5) ou bien des échantillons ayant subi une intense fissuration plus ou moins bien colmatée (par exemple l'échantillon 758.73).

4.2.4. - Détermination de la porosité totale à partir des courbes de séchage :

4.2.4.1. - Introduction :

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la méthode de mesure de la porosité où l'essuyage de l'échantillon saturé est réalisé avec une étoffe humide, n'est pas parfaitement adaptée à l'étude des roches très peu poreuses. Nous avons donc tenté de mettre au point une méthode de pesée du poids humide plus spécifique. Le principe de cette méthode repose sur la différence de vitesse d'évaporation qui existe entre l'eau superficielle se trouvant sur la surface extérieure de l'échantillon et l'eau contenue dans l'espace poreux.

Nous estimerons l'épaisseur de la pellicule d'eau recouvrant les éprouvettes à partir des courbes de séchage. La convergence des résultats obtenus avec les deux dimensions d'éprouvettes permettra de valider la méthode.

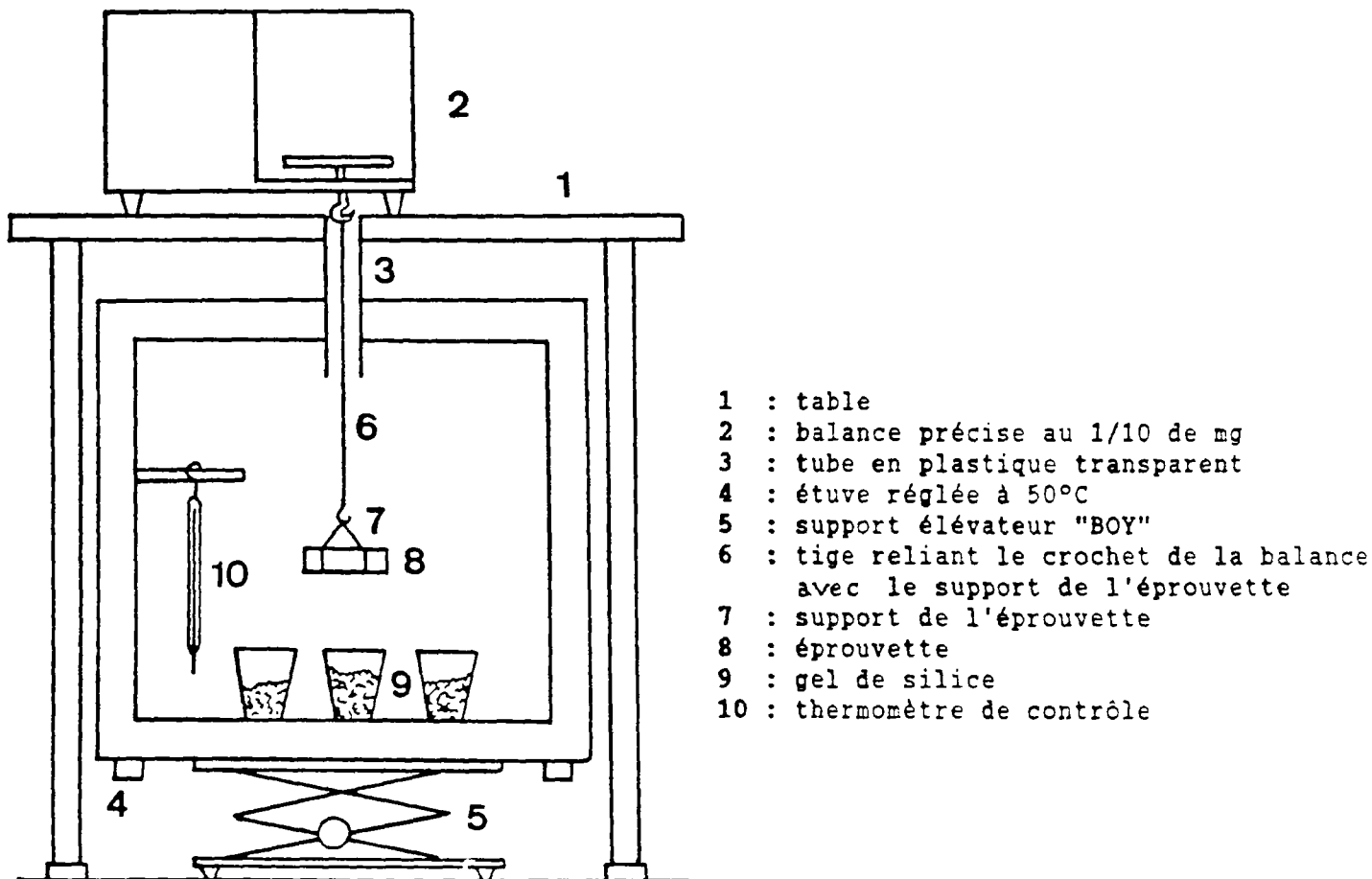


Fig.4.6 : dispositif de mesure du poids humide à partir des courbes de séchage.

Les mesures ont été effectuées sur 38 éprouvettes de diamètre $\varnothing = 20$ mm et sur 44 éprouvettes de diamètre $\varnothing = 10$ mm.

4.2.4.2. - Mise en oeuvre de l'expérience :

4.2.4.2.1. - Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est représenté sur la fig.4.6.

Un ensemble comprenant une nacelle et un filin est suspendu au crochet se trouvant sous le plateau d'une balance de précision. La nacelle est placée dans une étuve réglée à 50°C et dont le fond est tapissé de gel de silice. On tare la balance puis l'échantillon saturé est sorti de l'eau et placé immédiatement dans la nacelle.

Dans un premier temps les variations de poids sont importantes et la saisie des données est effectuée toutes les 5 secondes. Par la suite, les données sont saisies toutes les 10, 20, 30, 60 secondes puis toutes les 2 minutes et en fin de manipulation toutes les 5 minutes ou plus longtemps si nécessaire. On trace alors une courbe où le poids de l'échantillon saturé est exprimé en fonction du temps.

4.2.4.2.2. - Interprétation des courbes de séchage :

Les courbes de séchage se décomposent en deux parties. La première est caractérisée par un segment de droite ayant une forte pente négative. La pente diminue brutalement au bout de quelques minutes et on entre alors dans la deuxième partie de la courbe qui se stabilise en formant un plateau.

La première partie de la courbe témoigne d'un régime d'évaporation intense qui correspond à l'élimination de la pellicule d'eau superficielle recouvrant la surface extérieure de l'éprouvette.

Dans le cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm, la première partie de la courbe peut se décomposer en deux sous-parties. La première d'entre elles est constituée par un segment de droite de forte pente qui s'infléchit nettement au bout de 5 mn en moyenne.

Une fois que la pellicule d'eau superficielle a disparu, l'eau contenue dans l'espace poreux tend à s'évaporer mais avec beaucoup plus de difficulté. Cependant le passage entre la deuxième et la troisième partie de la courbe est plus ou moins progressif et dépend de la porosité totale de l'échantillon ainsi que de sa composition minéralogique.

Pour déterminer le poids humide de l'échantillon, on trace les tangentes correspondant aux différentes parties de la courbe et on note les ordonnées des points d'intersection. On définit ainsi un domaine d'imprécision.

Les fig.4.7.a.4.7.b.4.8.a et 4.8.b représentent deux exemples de courbe de séchage correspondant aux échantillons 699.12 qui est une mylonite ($n < 1$ %), et 324.05 un granite rubéfié ($n > 2$ %) contenant une phase argileuse (illite). Nous avons fait figurer pour chacun des deux échantillons, les courbes de séchage obtenues avec les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et $\phi = 10$ mm.

On constate que la rupture de pente est franche dans le premier cas et pratiquement absente dans le second. Plus l'échantillon est poreux et plus la rupture de pente est floue. Il est impossible de déterminer directement le poids humide à partir de la courbe de séchage lorsque les ruptures de pente sont absentes. Cependant, ce cas est très rare.

Précision sur la détermination des poids humides pour les échantillons 324.05 et 699.12 :

Echantillon 324.05 : la rupture de pente est floue. Dans ce cas $P_{111} = 31.0763 \pm 0.0740$ g soit une précision relative de 0.2 %.

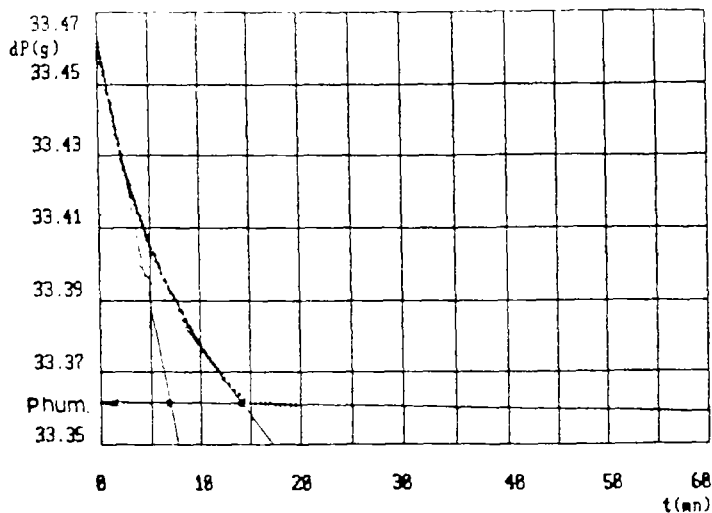
Echantillon 699.12 : la pente du plateau de la courbe est pratiquement nulle. Dans ce cas $P_{111} = 32.3615 \pm 0.0005$ g soit une précision relative de 0.001 %.

4.2.4.3. - Relation entre les mesures effectuées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm, et celles de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm :

Nous avons établi des courbes de séchage sur 38 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm ainsi que sur le même nombre d'éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm.

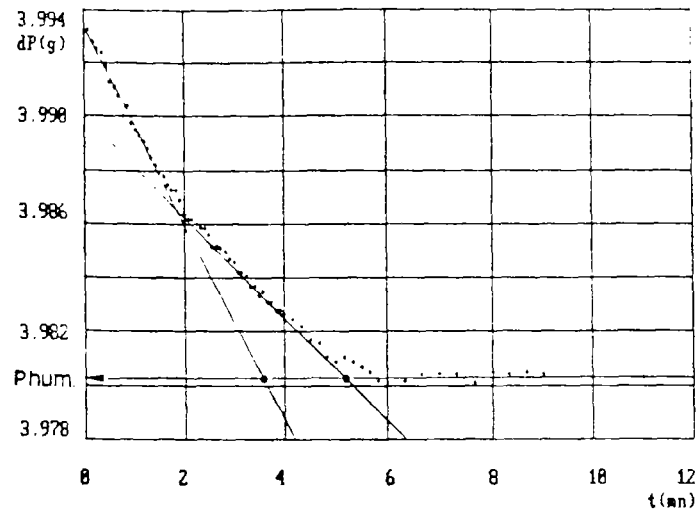
L'examen du tableau 4.6 montre que les porosités obtenues sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm sont nettement plus faibles que celles mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm. Le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries de porosités est de 0.955 et la droite de régression a pour équation (cf.fig.4.9) :

$$ns_{20}(\%) = 4.62 * ns_{10}(\%) + 0.15 \% \quad (4.23)$$



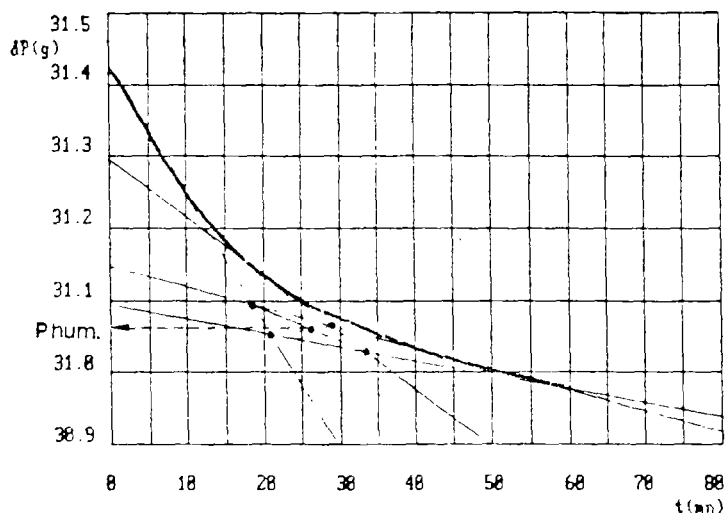
Courbe de séchage de l'échantillon 699.12
Eprouvette de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur
H = 40 mm

FIG.4.7.a



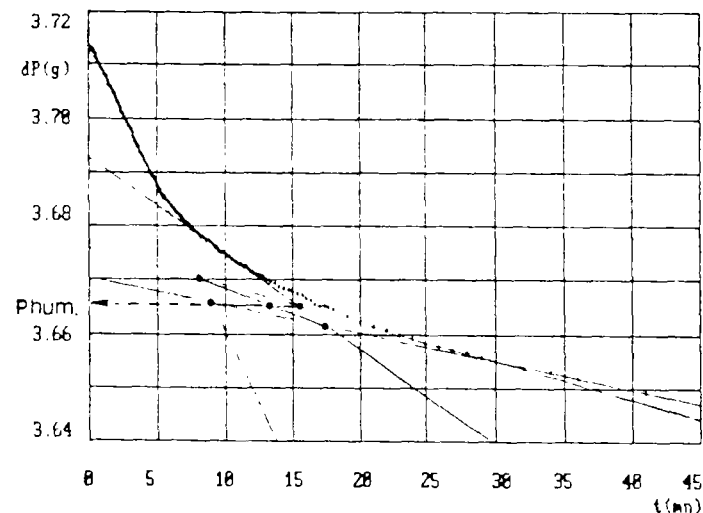
Courbe de séchage de l'échantillon 699.12
Eprouvette de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur
H = 20 mm

FIG.4.7.b



Courbe de séchage de l'échantillon 324.05
Eprouvette de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur
H = 40 mm

FIG.4.8.a



Courbe de séchage de l'échantillon 324.05
Eprouvette de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur
H = 20 mm

FIG.4.8.b

On confirme ainsi les résultats fournis par l'essuyage avec le papier absorbant sec (cf. tableau 4.5), ce qui prouve que les faibles valeurs de porosité obtenues sur les éprouvettes de 10 mm de diamètre ne sont pas dues à des anomalies opératoires. Il est probable que pour le granite d'Auriat riche en cristaux centimétriques, le carottage à 10 mm de diamètre fait disparaître une grande partie des joints de grains et donc une source majeure de porosité.

Même qu'il existe une bonne corrélation entre les deux séries de résultats, il apparaît quelques différences notables de classement.

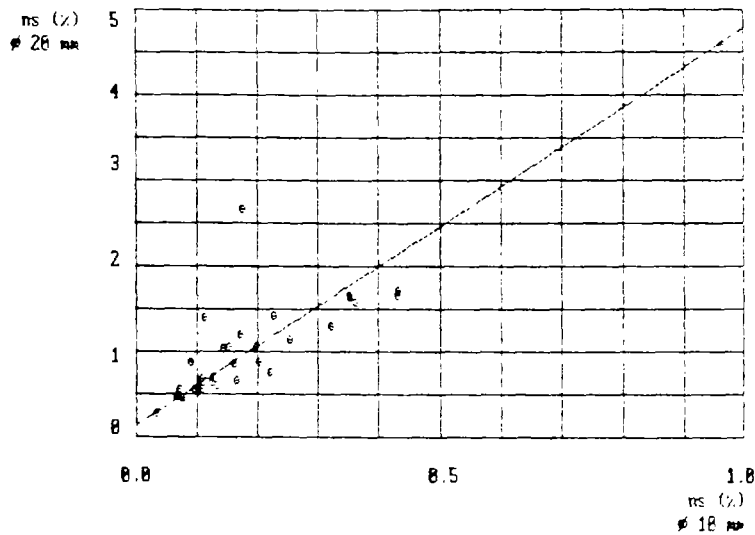
Ainsi, l'échantillon 402.80 passe de la 21^{ème} position ($\phi = 20$ mm) avec $n = 0.88$ %, à la 6^{ème} position ($\phi = 10$ mm) avec $n = 0.09$ %, l'échantillon 682.55 de la 28^{ème} ($\phi = 20$ mm) position avec $n = 1.39$ %, à la 14^{ème} position ($\phi = 10$ mm) avec $n = 0.11$ %, l'échantillon 34.20 de la 18^{ème} position ($\phi = 20$ mm) avec $n = 0.75$ % à la 26^{ème} position ($\phi = 10$ mm) avec $n = 0.22$ %.

Profondeur (m)	n1 (%) ø = 20 mm	n2 (%) ø = 10 mm	ASPECT DE LA ROCHE
12.00	23 1.07	19 0.15	Roche pourrie rubéfiée alt.météo
27.40	33 1.66	34 0.43	Granite rubéfié alt. météorique
34.20	18 0.75	26 0.22	Granite rubéfié alt. météorique
41.90	12 0.60	15 0.13	Granite rubéfié alt. météorique
105.10	8 0.56	11 0.11	Granite rubéfié
119.65	3 0.47	3 0.07	Granite peu rubéfié
171.12	27 1.31	29 0.32	Granite rubéfié
220.80	9 0.56	4 0.07	Granite rubéfié
237.30	2 0.45	2 0.07	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	22 1.04	18 0.14	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	5 0.47	5 0.08	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	31 1.63	30 0.35	Granite très rubéfié
324.05	36 4.58	36 0.97	G. rubéfié à minéraux argileux
391.53	25 1.13	28 0.25	Granite rubéfié
402.80	21 0.88	6 0.09	Granite rubéfié
469.20	34 1.73	35 0.43	Granite rubéfié
524.10	19 0.86	20 0.16	Granite rubéfié
535.29	10 0.56	9 0.10	Granite rubéfié
617.18	24 1.07	25 0.20	Granite rubéfié
643.73	29 1.42	27 0.23	Granite rubéfié cataclasé
682.55	28 1.39	14 0.11	Remplissage de fracture (silice)
699.12	1 0.28	1 0.03	<u>Mylonite de couleur sombre</u>
730.30	26 1.20	22 0.17	Granite rubéfié
758.73	35 2.65	23 0.18	G. rubéfié, fissure avec vacuoles
770.50	32 1.65	31 0.35	Granite rubéfié
784.20	30 1.57	32 0.36	Granite rubéfié
825.84	20 0.87	24 0.20	Granite rubéfié
854.63	15 0.66	21 0.17	<u>Mylonite rouge</u>
866.00	11 0.57	10 0.10	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	6 0.52	7 0.10	Granite gris G2 d'aspect sain
932.85	13 0.61	12 0.11	Granite rubéfié
966.40	17 0.70	17 0.13	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	14 0.63	16 0.13	Amas de biotite
976.60	7 0.55	8 0.10	<u>Mylonite rouge</u>
981.60	16 0.67	13 0.11	Granite gris G2 d'aspect sain

Tableau 4.6 : Porosités totales déterminées à partir des courbes de séchage pour 38 éprouvettes de diamètre ø = 20 mm, h = 40 mm et pour 38 éprouvettes de diamètre ø = 10 mm, h = 20 mm.

Les chiffres à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).

Il s'avère que les éprouvettes de diamètre ø = 10 mm et de hauteur 20 mm ne sont pas représentatives de la roche. La surface des joints entre les grains peuvent dans certains cas être réduits quasiment à zéro quand un phénocrystal constitue l'essentiel de l'éprouvette.



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage sur des éprouvettes de diamètres $\phi = 10$ mm (hauteur $H = 20$ mm) et $\phi = 20$ mm (hauteur $H = 40$ mm).

FIG.4.9

4.2.4.4. - Estimation de l'épaisseur de la pellicule d'eau recouvrant les deux types d'éprouvette au début de l'essai :

Connaissant les poids de l'échantillon saturé au début de l'essai et au niveau de la rupture de la pente, on peut déduire le poids d'eau de la pellicule d'eau superficielle recouvrant l'échantillon au début de l'essai.

En ce qui concerne les éprouvettes de diamètres $\phi = 20$ mm et $\phi = 10$ mm, ces valeurs sont groupées et les poids moyens correspondant sont respectivement :

$P_{\text{eau, pellicule}} = 0.1304$ g (moyenne établie à partir de 43 échantillons)

$P_{\text{eau, pellicule}} = 0.0315$ g (moyenne établie à partir de 36 échantillons)

En posant $\rho_{\text{eau}} = 1$ g/cm³ on obtient :

$V_{\text{eau, pellicule}} = 0.1304$ cm³

$V_{\text{eau, pellicule}} = 0.0315$ cm³

Si l'on rapporte ces volumes à la surface extérieure des échantillons, on obtient l'épaisseur de la pellicule d'eau :

- Pour les éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm :

$$e_{\text{pellicule}} = 0.1304 \text{ cm}^3 / 31.4159 \text{ cm}^2 = 0.00415 \text{ cm} = 40 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.24)$$

- Pour les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur 20 mm :

$$e_{\text{pellicule}} = 0.0315 \text{ cm}^3 / 7.8540 \text{ cm}^2 = 0.00401 \text{ cm} = 40 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.25)$$

On montre donc que quelque soit la taille de l'éprouvette de granite, l'épaisseur de la pellicule d'eau recouvrant l'échantillon au début de l'essai est constante et est égale à environ 40 μm .

L'épaisseur de 40 μm est évidemment caractéristique du granite et ne peut être généralisée à d'autres matériaux.

Une fois ce paramètre déterminé, il est possible de mesurer la porosité de n'importe quel échantillon de granite en effectuant seulement une pesée humide simple.

Afin d'illustrer notre propos, on se propose d'estimer la porosité apparente qu'induirait la prise en compte du volume d'eau pelliculaire pour un échantillon de granite ayant une porosité réelle d'1 % pour les deux types d'éprouvettes :

$$n_{\text{apparent}} = n_{\text{réel}} + n_{\text{eau pelliculaire}} \quad (4.26)$$

Eprouvette $\phi = 20$ mm et $H = 40$ mm :

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{réel}} &= 1.00 \% \\ n_{\text{eau pelliculaire}} &= (0.1304 / 12.5664) * 100 = 1.04 \% \\ n_{\text{apparent}} &= 2.04 \% \text{ soit le } \underline{\text{double}} \text{ de la porosité réelle.} \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

Eprouvette $\phi = 10$ mm et $H = 20$ mm :

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{réel}} &= 1.00 \% \\ n_{\text{eau pelliculaire}} &= (0.0315 / 1.5708) * 100 = 2.01 \% \\ n_{\text{apparent}} &= 3.01 \% \text{ soit le } \underline{\text{triple}} \text{ de la porosité réelle.} \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

4.2.4.5. - Relation entre les porosités obtenues à partir des courbes de séchages et celles déterminées après essuyage de l'échantillon :

4.2.4.5.1. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur 40 mm :

Les fig.4.10 et 4.11 montrent qu'il existe une relation simple entre les séries $n_{3,1}$ ou $n_{4,1}$ et $n_{s,1}$. Nous avons estimé manuellement les droites s'ajustant aux deux nuages de points, en éliminant les points dont la porosité était supérieure à 2 %. Leurs équations sont les suivantes :

$$n_{s,20}(\%) = n_{3,20}(\%) - 0.13 \% \quad (4.29)$$

$$n_{s,20}(\%) = n_{4,20}(\%) - 0.10 \% \quad (4.30)$$

En considérant que les porosités déterminées à partir des courbes de séchage sont les plus proches de la réalité, on peut estimer l'épaisseur de l'eau superficielle restant à la surface de l'échantillon après essuyage avec un papier sec *a priori* absorbant puis avec un papier sec *a priori* moyennement absorbant :

$$n_{\text{apparent}} = n_{\text{réel}} + n_{\text{eau pelliculaire}} \quad (4.31)$$

- Cas du papier *a priori* absorbant :

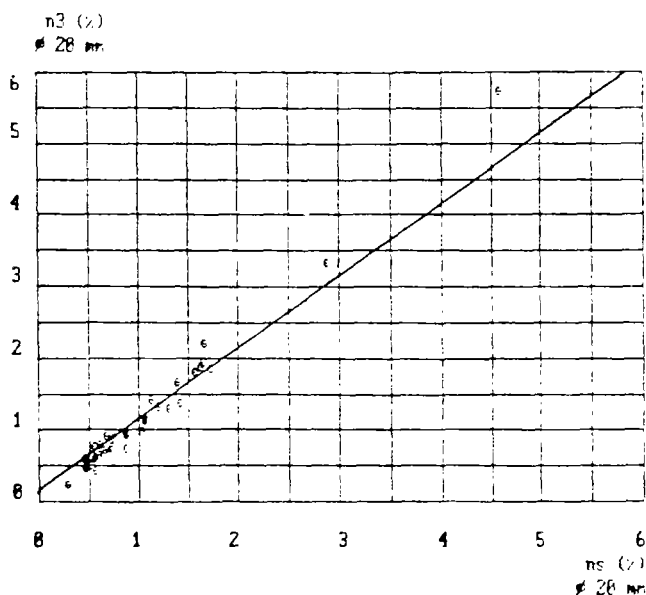
$$\begin{aligned} n_{\text{réel}} &= n_s \\ n_{\text{eau pelliculaire}} &= 0.13 \% \end{aligned}$$

d'où :

$$\text{Volume eau superficielle} = (0.13/100) * 12.5664 = 0.01634 \text{ cm}^3 \quad (4.32)$$

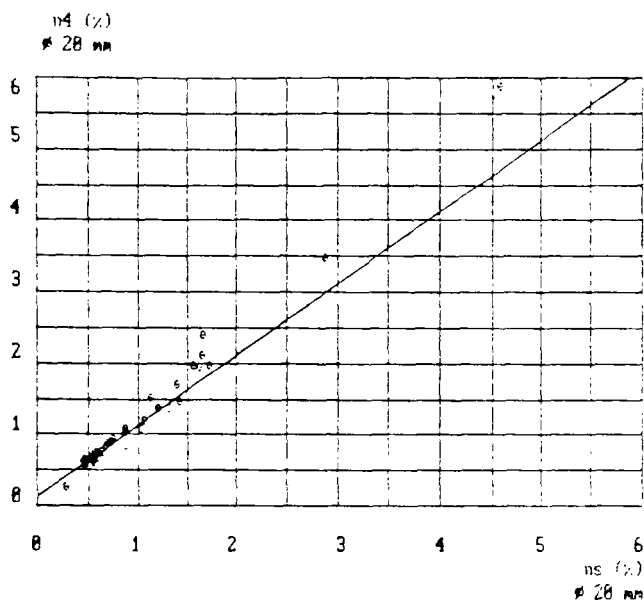
On en déduit l'épaisseur e de la pellicule d'eau superficielle :

$$e = 0.01634 \text{ cm}^3 / 31.4159 \text{ cm}^2 = 0.00052 \text{ cm} = 5 \mu\text{m} \quad (4.33)$$



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "doux" sur des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.

FIG.4.10



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "dur" sur des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur $H = 40$ mm.

FIG.4.11

- Cas du papier *a priori* moyennement absorbant :

$$n \text{ réel} = n_s$$

$$n \text{ eau pelliculaire} = 0.10 \%$$

d'où :

(4.34)

$$\text{Volume eau superficielle} = (0.10 / 100) \cdot 12.5564 = 0.01257 \text{ cm}^3$$

On en déduit l'épaisseur e de la pellicule d'eau superficielle :

$$e = 0.01257 \text{ cm}^3 / 31.4159 \text{ cm}^2 = 0.00040 \text{ cm} = 4 \mu\text{m} \quad (4.35)$$

Il résulte de ce calcul simple, qu'indépendamment de la qualité du papier qui a servi à l'essai, il reste environ le même volume d'eau superficiel sur l'éprouvette.

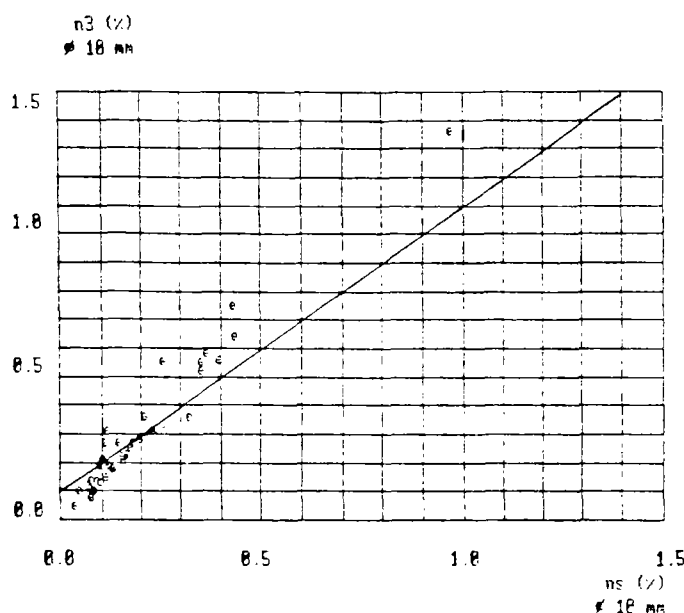
4.2.4.5.2. - Cas des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm :

Pour traiter les données relatives aux éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm, nous avons suivi la même démarche logique que celle adoptée dans le paragraphe 4.2.4.5.1.

Les corrélations entre les séries $n_{3,10}$, $n_{4,10}$ et $n_{s,10}$ (cf.fig.4.12 et 4.13) ne sont pas aussi bonnes que celles qui existent pour les séries homologues de diamètre $\phi = 20$ mm (cf.paragraphe 4.2.4.5.1.). Les équations des droites d'ajustement sont les suivantes :

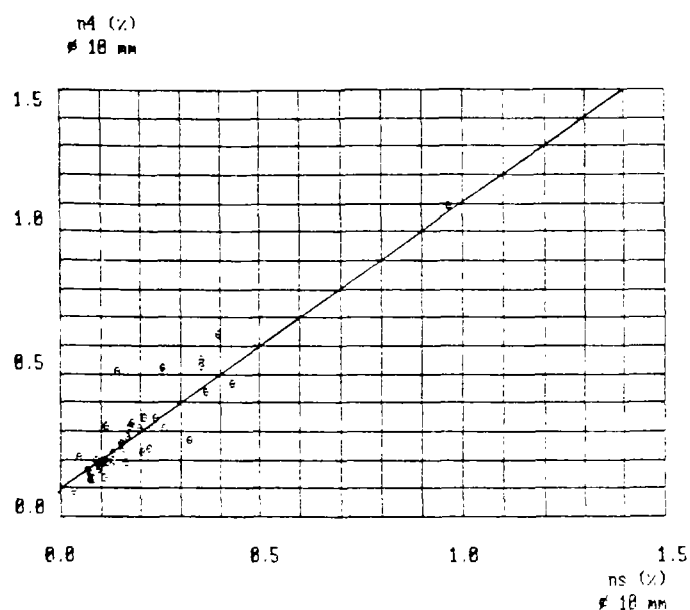
$$n_{s,10}(\%) = n_{3,10}(\%) - 0.10 \% \quad (4.36)$$

$$n_{s,10}(\%) = n_{4,10}(\%) - 0.10 \% \quad (4.37)$$



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "doux" sur des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur $H = 20$ mm.

FIG.4.12



Relation entre les séries de mesure de porosité où le poids humide est déterminé d'après les courbes de séchage et après essuyage avec un papier hygiénique "dur" sur des éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm et de hauteur $H = 20$ mm.

FIG.4.13

$$n \text{ apparent} = n \text{ réel} + n \text{ eau pelliculaire} \quad (4.38)$$

$$n \text{ réel} = n_s$$

$$n \text{ eau pelliculaire} = 0.13 \%$$

d'où :

$$\text{Volume eau superficielle} = (0.10/100) \cdot 1.5708 = 0.001571 \text{ cm}^3 \quad (4.39)$$

On en déduit l'épaisseur e de la pellicule d'eau superficielle :

$$e = 0.001571 \text{ cm}^3 / 7.8540 \text{ cm}^2 = 0.00020 \text{ cm} = 2 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.40)$$

Les estimations de l'épaisseur de la pellicule d'eau superficielle convergent quelques soient les tailles des éprouvettes et la qualité de papier absorbant employée. Cela prouve que la méthode de détermination du poids humide après essuyage avec un papier absorbant sec est fiable et que les résultats obtenus sont compatibles avec ceux des courbes de séchage.

4.2.4.6. - Conclusion :

La méthode de détermination de la porosité totale à partir des courbes de séchage est délicate et longue à mettre en oeuvre.

L'acquisition des résultats demande une heure environ pour une éprouvette de 12.5 cm^3 . Cette technique a permis de montrer que l'échantillon de granite saturé est recouvert d'une pellicule d'eau de $40 \text{ } \mu\text{m}$ au sortir du milieu aqueux, et cela quelque soit sa taille. Cette constatation permet d'affirmer que cette méthode permet d'accéder à la porosité réelle d'un échantillon de granite très peu poreux.

La technique de détermination du poids humide après essuyage de l'échantillon avec un papier absorbant sec est reproductible et se corrèle bien avec celle des courbes de séchage.

On a ainsi pu quantifier l'épaisseur de la pellicule d'eau résiduelle (de 2 à 5 µm) subsistant sur les éprouvettes essuyées et ainsi valider cette méthode.

4.2.5. - Détermination de la porosité totale à partir de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales dans le milieu poreux :

4.2.5.1. - Introduction :

4.2.5.1.1. - Principe :

Les mesures des vitesses v_L de propagation des ondes soniques longitudinales peuvent se rattacher à la porosité du granite de manière quantitative par la loi de Willie.

Considérons un milieu poreux de porosité n . Un calcul simple permet d'évaluer v_L dans ce milieu :

$$\frac{1}{v_L} = \frac{(1-n)}{v_{La}} + \frac{n}{v_{Lp}} \quad (4.41)$$

Les indices a et p désignent respectivement l'agrégat et les pores.

Suivant que l'on mesure v_L dans un échantillon sec ou saturé, il vient :

$$v_{Lp} = v_{Lair} = 330 \text{ m/s}$$

$$v_{Lp} = v_{Leau} = 1485 \text{ m/s}$$

de la relation (4.41) on tire le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1/v_{Lsat} = (1-n) / v_{La} + n / v_{Leau} \\ 1/v_{Lsec} = (1-n) / v_{La} + n / v_{Lair} \end{array} \right. \quad (4.42)$$

$$(4.43)$$

La résolution de ce système d'équation permet d'exprimer la porosité en fonction de v_{Lsat} , v_{Lsec} , v_{Lair} et v_{Leau} :

$$n = \frac{1/v_{Lsat} - 1/v_{Lsec}}{1/v_{Leau} - 1/v_{Lair}} \quad (4.44)$$

en introduisant les valeurs numériques de v_{Leau} (1485 m/s) et v_{Lair} (330 m/s) on obtient l'expression :

$$n = \frac{1/v_{Lsat} - 1/v_{Lsec}}{1/1485 - 1/330} \quad (4.45)$$

Ce calcul néglige l'influence spécifique de la porosité de fissures sur la chute de v_L .

4.2.5.1.2. - Dispositif expérimental :

Il est en tout point identique à celui décrit dans le chapitre -3-, paragraphe 3.3.1.2.

Profondeur (m)	nv (%) ø = 20 mm		— nv (%) ø = 10 mm		Aspect de la roche
12.00	34	2.94	21	1.55	<i>Roche pourrie rubéfiée alt.météo</i>
27.40	25	1.84	14	1.34	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
34.20	29	2.29	29	1.88	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
41.90	21	1.60	16	1.39	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
105.10	24	1.82	22	1.59	Granite rubéfié
119.65	19	1.58	17	1.40	Granite rubéfié
160.05	8	1.06	13	1.31	Granite gris cataclasé
171.12	14	1.34	20	1.52	Granite rubéfié
220.80	23	1.81	26	1.69	Granite rubéfié
237.30	36	3.67	33	2.35	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	26	1.85	28	1.77	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	27	2.04	15	1.38	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	16	1.43	9	1.10	Granite très rubéfié
324.05	33	2.75	25	1.68	G.rubéfié à minéraux argileux
391.53	32	2.49	35	2.60	Granite rubéfié
402.80	31	2.34	4	0.88	Granite rubéfié
469.20	6	1.03	10	1.26	Granite rubéfié
524.10	7	1.04	6	1.02	Granite rubéfié
535.29	20	1.59	3	0.84	Granite rubéfié
617.18	17	1.46	30	1.94	Granite rubéfié
643.73	9	1.07	12	1.31	Granite rubéfié cataclasé
682.55	13	1.24	2	0.70	Remplissage de fracture (silice)
699.12	1	0.34	1	0.45	Mylonite de couleur sombre
730.30	11	1.14	24	1.67	Granite rubéfié
758.73	3	0.93	19	1.48	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
770.50	12	1.18	34	2.51	Granite rubéfié
784.20	4	0.94	23	1.65	Granite rubéfié
825.84	10	1.11	11	1.29	Granite rubéfié
854.63	2	0.89	7	1.05	Mylonite rouge
866.00	28	2.11	32	2.08	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	5	1.02	18	1.46	Granite gris G1 d'aspect sain
932.85	15	1.36	27	1.77	G.rubéfié
966.40	35	3.01	36	2.62	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	30	2.33	31	2.04	Amas de biotite
976.60	22	1.80	8	1.09	Mylonite rouge
981.60	18	1.55	5	1.00	Granite gris G2 d'aspect sain

Tableau 4.7 : Porosités totales déterminées à partir de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales dans les éprouvettes de granite de diamètre ø = 20 mm et ø = 10 mm, et d'éclatement 2.

Les chiffres à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).

4.2.5.2. - Résultats :

Nous avons effectué les mesures de vitesses longitudinales sur 42 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm caractéristiques de 42 profondeurs et sur 231 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm caractéristiques de 43 profondeurs. Pour les 2 séries de mesures, 36 profondeurs peuvent être comparées.

4.2.5.3. - Commentaires :

Nous avons vu précédemment que quelque soit la méthode adoptée pour mesurer la porosité totale, une certaine hiérarchie en porosité croissante était respectée.

Dans le cas présent, mises à part les valeurs extrêmes de porosité, non seulement la hiérarchie n'est pas respectée entre les éprouvettes de diamètres différents (cf. tableau 4.7), mais semble même être inversée par rapport aux autres méthodes.

Cela s'explique par le comportement des ondes soniques dont la vitesse de propagation varie suivant la configuration de l'espace poreux. En effet, pour un même volume de vide, la vitesse sera beaucoup plus faible dans le cas d'un échantillon dont la porosité est de nature fissurale que dans le cas où elle serait constituée en majorité de pores.

Cette notion de discrimination de porosité de pores et de porosité de fissures sera plus longuement abordé dans le paragraphe 4.3.1.1.

Nous pouvons d'ores et déjà tirer les conclusions suivantes :

Les échantillons représentatifs des parties saines sont très mal classés par rapport aux autres faciès. Bien qu'ils soient en réalité très peu poreux (cf. tableau 4.6), ils sont microfissurés.

Le faciès mylonitique reste le plus performant ce qui s'explique par la recimentation systématique de l'espace poreux.

En ce qui concerne les autres faciès c'est à dire ceux qui ont des caractéristiques d'altérations moins tranchées, ni les valeurs des porosités, ni la hiérarchie ne sont exploitables.

4.2.5.4. - Conclusion :

La méthode de détermination des porosités à partir de la vitesse de propagation des ondes soniques longitudinales ne peut pas prétendre appréhender de manière exacte le volume de l'espace poreux. Au mieux, elle peut donner un ordre de grandeur de la porosité. Appliquée au cas des granites d'Auriat, cette méthode a montré ses faiblesses : les faciès sain dont nous avons montré précédemment leur très faible porosité par rapport aux autres faciès (mylonites mises à part), apparaissent maintenant comme les plus poreux !

4.2.6. - Conclusion - Détermination du volume minimal de granite représentatif de la roche - Choix définitif de la méthode de mesure de la porosité totale :

Dans le cas de l'étude d'un sondage où par définition la quantité de matériau disponible pour une étude en laboratoire est limitée, il apparaît qu'il est dangereux de mesurer des porosités sur des éprouvettes de volume inférieure à 12.5 cm³. Il serait nécessaire, dans le cas où des phénocristaux pluricentimétriques de feldspaths sont dispersés dans une matrice de texture fine, d'utiliser un volume de granite beaucoup plus important pour effectuer la mesure de porosité.

Compte tenu des contraintes imposées par la faible porosité du granite et de la petite taille des éprouvettes, il est indispensable d'adapter la technique classique de mesure de la porosité totale. Nous avons montré que la détermination du poids sec et du volume total ne posait pas de problème particulier. La mesure du volume total de l'échantillon avec le pied à coulisse donne une précision suffisante. Par contre, il est indispensable d'affiner la technique de mesure du poids humide.

Suivant le degré de précision souhaité deux solutions peuvent être envisagées :

1) *La détermination du poids humide à partir de courbes de séchage* : cette technique est la plus fiable mais aussi la plus délicate et la plus longue à mettre en oeuvre. Cette technique a permis de montrer qu'une carotte de granite saturé, quelle que soit sa dimension, est recouverte, au début de l'essai, d'une pellicule d'eau de 40 µm d'épaisseur environ.

2) *La détermination du poids humide en pesant l'échantillon saturé après l'avoir essuyé avec un papier absorbant sec* : cette technique est facile et rapide à mettre en oeuvre, délivre des résultats reproductibles, mais une petite partie de l'eau pelliculaire n'est pas éliminée : cette couche d'eau a une épaisseur comprise entre 2 et 5 µm. Cette méthode est adaptée aux essais de routine.

La fig.4.14 récapitule sous forme d'histogrammes les valeurs de porosité obtenues par les différentes méthodes que nous avons employées (exceptée celle fondée sur la connaissance de v_{L1} et v_{L2}).

Dans la suite de l'étude nous utiliserons les porosités mesurées à partir des courbes de séchage.

4.3. - Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat en porosité de pores et en porosité de fissures :

4.3.1. - Détermination des indices de qualité des roches par les mesures des vitesses de propagation des ondes longitudinales :

4.3.1.1. - Détermination des vitesses théoriques de propagation des ondes longitudinales dans le granite d'Auriat :

De nombreux auteurs ont démontré que les propriétés élastiques d'une roche sont déterminées par celles des minéraux qui la composent.

Disposant de l'analyse minéralogique quantitative de la roche ainsi que des valeurs de la vitesse théorique de la propagation des ondes longitudinales dans chaque famille de minéraux, on peut calculer la vitesse théorique de propagation des ondes longitudinales dans l'agrégat de minéraux que constitue la roche. (cf. tableaux 4.8 et 1.1 chapitre -1-, paragraphe 1.3.2.1).

Pour ce faire, on utilise la formule de pondération suivante :

$$100 * v_{Lt} = \sum_{i=1}^n C_i * v_{Li} \quad (4.46)$$

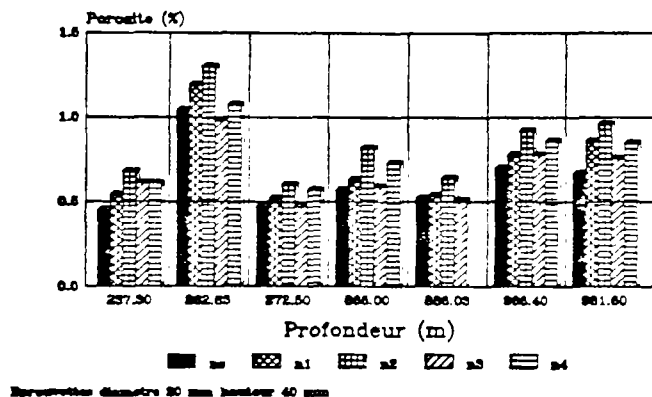
v_{Li} : valeur théorique de la vitesse de propagation (m/s) des ondes longitudinales dans le granite d'Auriat.

v_{Li} : valeur théorique de la vitesse de propagation (m/s) correspondant au i^{ème} minéral.

C_i : teneur en % du i^{ème} minéral.

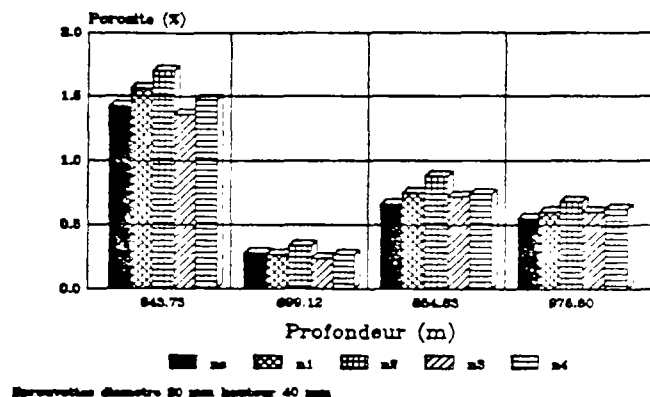
GRANITE GRIS A L'ASPECT SAIN

Comparaison des porosites mesurees
a partir de 5 methodes



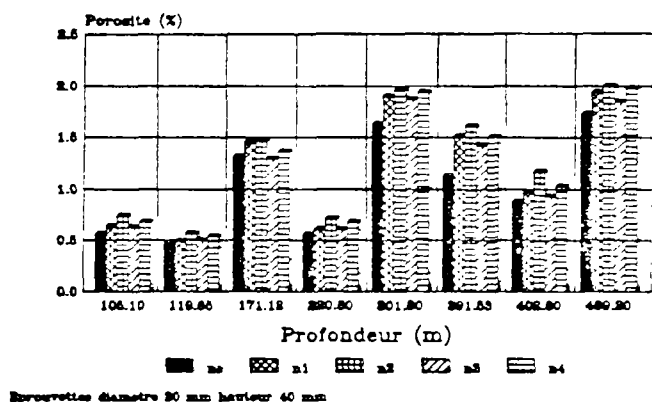
MYLONITES

Comparaison des porosites mesurees
a partir de 5 methodes



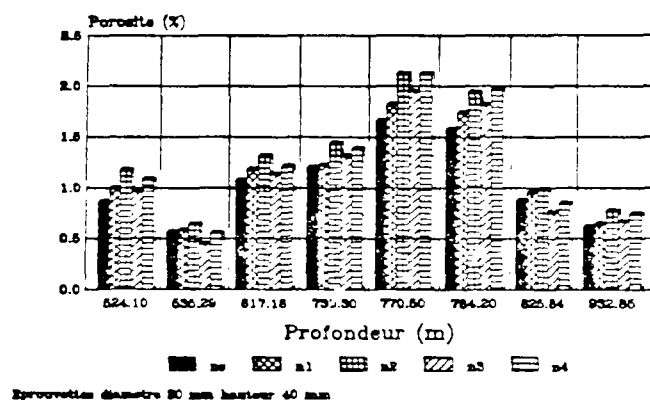
GRANITE RUBEFIÉ (0 - 500 m)

Comparaison des porosites mesurees
a partir de 5 methodes



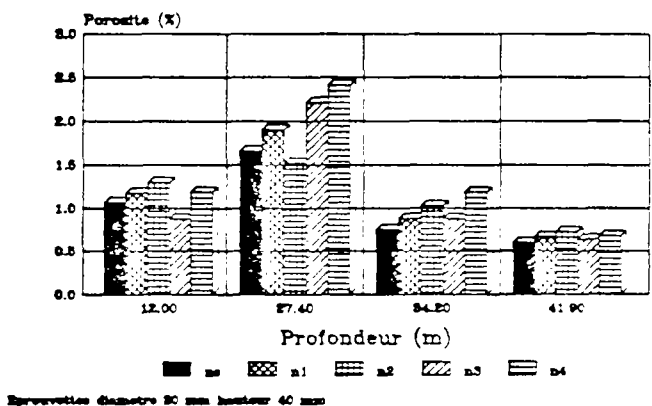
GRANITE RUBEFIÉ (500 - 1000 m)

Comparaison des porosites mesurees
a partir de 5 methodes



GRANITE RUBEFIÉ ALTERATION METEORIQUE

Comparaison des porosites mesurees
a partir de 5 methodes



ns : détermination à partir d'une courbe de séchage.
n1 : opérateur 1 - essuyage avec une étoffe humide.
n2 : opérateur 2 - essuyage avec une étoffe humide.
n3 : opérateur 1 - essuyage avec un papier absorbant sec.
n4 : opérateur 1 - essuyage avec un papier peu absorbant sec.

Fig.4.14 : Comparaison des porosités mesurées à partir de 5 méthodes différentes. Représentation en fonction des faciès d'altération.

Minéral	vitesse v_l (m/s)
Quartz	6030
Muscovite	5810
Biotite	5130
Orthose	5760
Oligoclase	6300

Tableau 4.8 : Vitesses longitudinales moyennes dans les principaux minéraux constitutifs du granite d'après K.S.ALEXANDROV, B.P.BELIKOV et T.V.RIZOVA (1966).

Nous avons utilisé les vitesses longitudinales moyennes établies par K.S.ALEXANDROV, B.P.BELIKOV et T.V.RIZOVA (1966) (cf.tableau 4.8) ainsi que les compositions modales du granite d'Auriat définies par le B.R.G.M. à différentes profondeurs (cf.tableau 1.1, chapitre -1-, paragraphe 1.3.2.1).

Il apparaît que la vitesse longitudinale théorique varie très peu dans le granite d'Auriat et on peut considérer que cette valeur est de l'ordre de 5990 m/s.

C.TOURENCQ et D.FOURMAINTRAUX (1971) ont montré que la vitesse des ondes longitudinale était indépendante de la taille des cristaux. On peut donc considérer que la différence entre la valeur calculée et la vitesse mesurée a pour cause l'existence de discontinuités dans le milieu rocheux.

Les discontinuités sont de deux types :

- les pores , caractérisés par l'isotropie de leur extension spatiale ;
- les fissures , caractérisées par leur planéité.

L'ensemble de ces deux types de discontinuités constitue la porosité totale.

Nous avons effectué les mesures de vitesses longitudinales sur 42 éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm caractéristiques de 42 profondeurs et sur 231 éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm caractéristiques de 43 profondeurs. Pour les 2 séries de mesures, 36 profondeurs peuvent être comparées.

D'autre part nous avons réalisé les mêmes séries de mesures sur les mêmes échantillons saturés.

4.3.1.2. - Détermination des indices de qualité :

Un des intérêts des mesures des vitesses de propagation des ondes longitudinales est de pouvoir les comparer avec la vitesse théorique correspondant au même milieu idéalement sain et par là même définir un indice de qualité de la roche.

Les rapports entre vitesses mesurées (dans la roche sèche v_{ls} puis saturée v_{lsat}) et calculées v_{lc} exprimés en pourcentage, déterminent deux indices de qualité :

$$I_{qsec} = 100 * \frac{v_{lsat}}{v_{lc}} \quad (4.47)$$

$$I_{q_{sat}} = 100 * \frac{V_{Lmsat}}{V_{Lc}} \quad (4.48)$$

Dans tous les cas, on a les conditions aux limites suivantes :

- 1) $V_{Lmsc} < V_{Lc}$
- 2) $V_{Lmsat} < V_{Lc}$
- 3) $V_{Lmsc} < V_{Lmsat}$
- 4) $0 \leq I_{qsec} \leq 100$
- 5) $0 \leq I_{qsat} \leq 100$

Lorsque I_{qsec} est très proche de 100, la roche tend vers son modèle parfait.

En ce qui concerne les mesures effectuées sur les échantillons saturés, on observe pour les milieux fissurés une forte augmentation de vitesse alors que dans les milieux poreux la vitesse ne varie guère. L'onde sonique a tendance à contourner le pore, que celui-ci soit rempli d'air ou d'eau alors que dans le cas d'une fissure, l'onde sonique ne peut éviter de traverser l'espace poreux.

C.TOURENCQ, D.FOURMAINTRAUX et A.DENIS (1971), ont proposé une appréciation du niveau d'altération des roches (roches intrusives, éruptives et métamorphiques - roches sédimentaires) en fonction des indices de qualité (cf.tableau 4.9).

Indice de qualité I_{qsec}	Appréciation	
	Milieux fissurés	Milieux poreux
> 95	Très bon = pas d'altération	$n < 3 \%$
90 - 95	Bon = faibles altérations	$n \approx 3 \text{ à } 8 \%$
80 - 90	Moyen = début d'altérations très nettes	$n \approx 8 \text{ à } 25 \%$
60 - 80	Médiocre = fortes altérations	$n \approx 15 \text{ à } 25 \%$
< 60	Mauvais = très fortes altérations	$n > 25 \%$

Tableau 4.9 : Proposition d'une charte d'évaluation du degré d'altération des roches en fonction des indices de qualité I_{qsec} d'après C.TOURENCQ et D.FOURMAINTRAUX (1971)

4.3.2. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pore et en porosité de fissure :

4.3.2.1. - Principe :

4.3.2.1.1. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures d'après l'indice de qualité I_{qsec} :

A partir de de l'indice de qualité I_{qsec} , on peut décomposer la porosité totale en une porosité de pores notée n_p et en une porosité de fissure notée n_f , avec $n = n_p + n_f$

C.TOURENCQ, D.FOURMAINTRAUX et A.DENIS (1971) ont représenté dans un diagramme ($I_{q_{sec}}$, n) les points représentatifs des roches qu'ils avaient étudiées c'est à dire :

- une série de roches éruptives (granites, microgranites, diorites) et métamorphiques (gneiss, micaschistes, quartzites, calcaires cristallins) toutes caractérisées par une texture holocristalline grenue ou microgrenue affectée par des discontinuités du type "fissure".²²

- une série de roches sédimentaire (calcaires et grès) ou des roches volcaniques vacuolaires. Dans ce cas la porosité est élevée et les vides sont du type "pores".

Sur un des cotés du triangle s'alignent les points où la porosité de fissures peut être considérée comme négligeable. Celui-ci est représenté par la droite d'équation (C.TOURENCQ & al., 1971) :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 1.6 * n_p \quad (4.49)$$

Sur l'autre côté du triangle sont disposés les points qui correspondent aux roches dépourvues de fissures. Celui-ci est représenté par la droite d'équation (C.TOURENCQ & al., 1971) :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 22 * n_f \quad (4.50)$$

P. LE BERRE (1975) étudiant les caractéristiques de granulats routiers à hautes performances, est amené à étendre le triangle en déplaçant la droite représentative des roches dépourvues de pores. Il définit une droite d'équation :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 47 * n_f \quad (4.51)$$

G.DURAND (1978) travaillant sur des granites a défini l'équation suivante :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 50 * n_f \quad (4.52)$$

Remarque : la comparaison de la pente de la droite (4.49) avec celles des droites (4.50), (4.51) et (4.52) met en évidence l'effet beaucoup plus important des fissures sur la qualité de la roche, que l'effet des pores.

Si l'on admet que ces effets sont cumulatifs, on peut écrire pour les roches dotées à la fois de pores et de fissures, la relation (G.DURAND, 1978) :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 1.6 * n_p - 50 * n_f \quad (4.53)$$

$$\text{avec } n = n_p + n_f \quad (4.54)$$

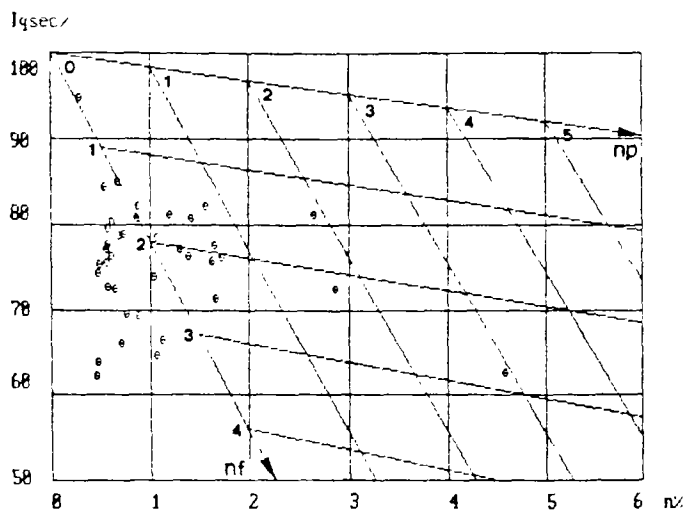
On peut ainsi graduer l'intérieur du triangle par des droites parallèles d'égales porosité de fissures et par des droites d'égale porosité de pores.

4.3.2.1.2. - Décomposition de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures d'après l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$:

La décomposition de la porosité totale peut s'effectuer à partir de $I_{q_{sec}}$ pour aboutir à une porosité de fissure notée n_f et à une porosité de pores notée n_p .

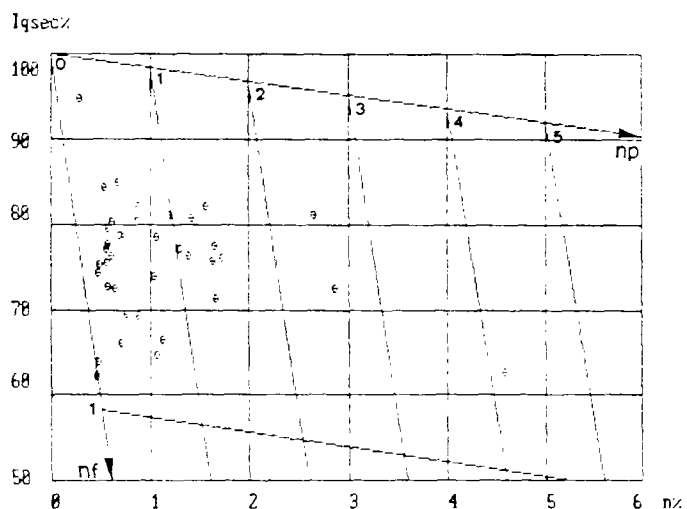
Le principe est le même que celui utilisé avec $I_{q_{sec}}$.

Nous avons vu dans le paragraphe 4.3.1.2. que la présence d'eau dans les pores n'affecte pas de façon significative la vitesse de propagation des ondes longitudinales. Ceci a pour conséquence de garder la même équation que celle considérée pour la décomposition à partir de $I_{q_{sec}}$, soit (C.TOURENCQ & al., 1971) :



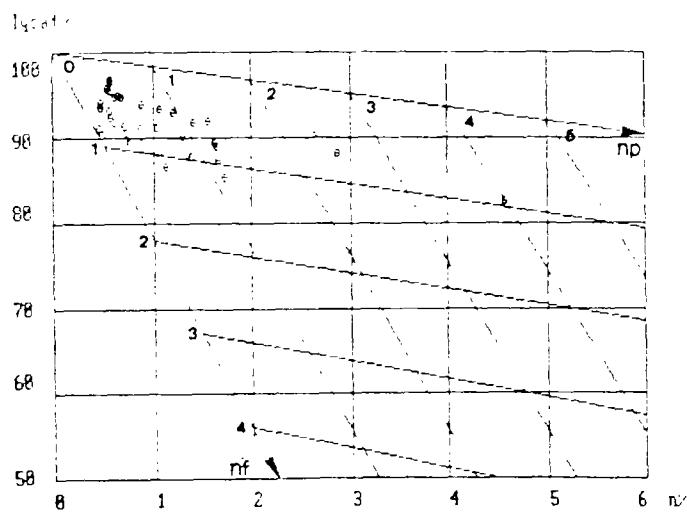
Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, d'après les coefficients déterminés par C. TOURENCO, D. FOURMAINTRAUX, A. DENIS (1971).

FIG.4.15



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, d'après les coefficients déterminés à partir du sondage.

FIG.4.16



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité Iqat

FIG.4.17

$$I_{q_{sat}} = 100 - 1.6 * n'_p \quad (4.55)$$

En ce qui concerne la droite des roches fissurées dépourvues de pores, elle est tracée en considérant le point le plus proche de l'axe $I_{q_{sat}}$. On obtient alors l'équation suivante (C.TOURENCQ & al., 1971) :

$$I_{q_{sat}} = 100 - 22 * n'_f \quad (4.56)$$

La relation générale entre l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$ d'une part, et n'_p et n'_f d'autre part est la suivante (C.TOURENCQ & al., 1971) :

$$I_{q_{sat}} = 100 - 1.6 * n'_p - 22 * n'_f \quad (4.57)$$

4.3.3. - Cas du granite d'Auriat :

4.3.3.1. - Définition des diagrammes (n_f , n_p) et (n'_f , n'_p) à partir de $I_{q_{sat}}$ et de $I_{q_{sec}}$:

Nous avons placé les points représentatifs des granites dans un repère $I_{q_{sat}}$ en fonction de la porosité n (cf.fig.4.15) auquel nous avons superposé le diagramme de TOURENCQ.

Il s'avère que de nombreux points sortent des limites du triangle. Nous pensons que la droite représentative des roches fissurées doit-être déplacée de telle façon que tous les points se placent à l'intérieur du triangle (la position de cette droite est déterminée par le point le plus proche de l'axe des $I_{q_{sat}}$). Nous avons représenté ce nouveau domaine sur la fig.4.16

L'équation correspondante de la droite des roches fissurées et dépourvues de pores est :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 83 * n_f \quad (4.58)$$

La relation générale entre l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$ d'une part, et n_p et n_f d'autre part devient :

$$I_{q_{sec}} = 100 - 1.6 * n_p - 83 * n_f \quad (4.59)$$

La relation générale entre l'indice de qualité $I_{q_{sat}}$ d'une part, et n'_p et n'_f d'autre part est la suivante (cf.fig.4.17) :

$$I_{q_{sat}} = 100 - 1.6 * n'_p - 22 * n'_f \quad (4.60)$$

4.3.3.2. - Exploitation des résultats :

4.3.3.2.1. - Introduction :

Nous avons choisi de représenter les résultats obtenus par type de décomposition (suivant $I_{q_{sat}}$ et $I_{q_{sec}}$) et par faciès d'altération.

Nous avons défini 5 faciès distincts :

- 1) granite gris à l'aspect sain.
- 2) mylonite et granite cataclasé (rubéfié ou non)
- 3) granite rubéfié dont la porosité est inférieure à 2 %.
- 4) granite rubéfié dont la porosité est supérieure à 2 %.
- 5) granite rubéfié ayant subi une altération météorique.

Profondeur (m)	n_p (%) (*)	n_f (%) (*)	n (%) (*)	$I_{q_{sec}}$ (%)(**)	Aspect de la roche
12.00	22 0.65	36 0.41	25 1.07	35 65	Roche pourrie rubéfiée alt.météo
27.40	32 1.35	30 0.32	34 1.66	30 71	G.rubéfié altération météorique
34.20	16 0.39	33 0.36	19 0.75	31 70	G.rubéfié altération météorique
41.90	13 0.32	23 0.28	12 0.60	22 76	Granite rubéfié
105.10	10 0.30	20 0.26	10 0.56	16 78	Granite rubéfié
119.65	4 0.18	25 0.29	5 0.47	24 75	Granite peu rubéfié
153.35	37 2.59	22 0.28	37 2.87	29 72	G.rubéfié à fissures colmatées
171.12	28 1.05	16 0.25	28 1.31	18 77	Granite rubéfié
220.80	7 0.27	24 0.29	9 0.56	23 75	Granite rubéfié
233.48	2 0.04	37 0.43	4 0.47	36 64	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	1 0.00	38 0.45	2 0.45	38 62	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	25 0.75	26 0.30	23 1.04	26 74	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	3 0.16	27 0.31	3 0.47	25 74	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	33 1.37	19 0.26	32 1.63	21 76	Granite très rubéfié
324.05	38 4.21	34 0.37	38 4.58	37 63	G.rubéfié à minéraux argileux
391.53	24 0.74	34 0.39	26 1.13	33 67	Granite rubéfié
402.80	20 0.52	31 0.36	22 0.88	32 69	Granite rubéfié
469.20	35 1.47	18 0.26	35 1.73	20 76	Granite rubéfié
513.88	18 0.48	14 0.24	18 0.72	13 79	Granite rubéfié cataclaté
524.10	21 0.64	9 0.22	20 0.86	9 81	Granite rubéfié
535.29	12 0.32	13 0.24	8 0.56	11 80	Granite rubéfié
617.18	26 0.83	12 0.24	24 1.07	15 78	Granite rubéfié
643.73	31 1.21	8 0.21	30 1.42	8 81	Granite rubéfié cataclaté
682.55	29 1.13	17 0.26	29 1.39	19 76	Remplissage de fracture (silice)
699.12	5 0.22	1 0.06	1 0.28	1 95	Mylonite de couleur sombre
730.30	27 0.99	7 0.21	27 1.20	7 81	Granite rubéfié
758.73	36 2.47	4 0.18	36 2.65	6 81	G.rubéfié, fissure avec vacuole
770.50	30 1.14	11 0.24	33 1.66	14 78	Granite rubéfié
784.20	34 1.38	5 0.19	31 1.57	5 82	Granite rubéfié
825.84	22 0.67	6 0.20	21 0.87	4 82	Granite rubéfié
854.63	19 0.49	2 0.17	15 0.66	2 85	Mylonite rouge
866.00	6 0.24	29 0.32	11 0.57	28 73	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	14 0.34	3 0.18	6 0.52	3 84	Granite gris G2 d'aspect sain
932.85	15 0.38	10 0.23	13 0.61	10 80	Granite rubéfié
966.40	9 0.30	35 0.40	17 0.70	34 66	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	11 0.31	28 0.32	14 0.63	27 73	Enclave de biotite
976.60	8 0.28	21 0.27	7 0.55	17 77	Mylonite rouge
981.60	17 0.43	15 0.25	16 0.67	12 79	Granite gris G2 d'aspect sain

Tableau 4.10 : Décomposition de la porosité totale en porosité de pores n_p et en porosité de fissures n_f , d'après l'indice de qualité $I_{q_{sec}}$.

(*) Les chiffres à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).(**) ou la position de l'indice de qualité dans sa série de mesure (par ordre décroissant).

Profondeur (m)	n' _p (%) (*)	n' _f (%) (*)	n (%) (*)	I _{q sat} (**)	Aspect de la roche
12.00	23 0.56	36 0.51	25 1.07	34 88	Roche pourrie rubéfiée alt.météo
27.40	32 1.17	34 0.49	34 1.66	35 87	G.rubéfié altération météorique
34.20	13 0.29	32 0.46	19 0.75	31 89	G.rubéfié altération météorique
41.90	6 0.25	23 0.36	12 0.60	19 92	G.rubéfié altération météorique
105.10	18 0.45	2 0.11	10 0.56	3 97	Granite rubéfié
119.65	1 0.03	30 0.44	5 0.47	27 90	Granite peu rubéfié
153.35	37 2.52	22 0.35	37 2.87	33 88	G.rubéfié à fissures colmatées
171.12	28 0.92	25 0.39	28 1.31	26 90	Granite rubéfié
220.80	8 0.27	17 0.29	9 0.56	15 93	Granite rubéfié
233.48	3 0.19	16 0.28	4 0.47	14 93	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	2 0.05	27 0.40	2 0.45	25 91	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	25 0.69	20 0.35	23 1.04	24 91	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	4 0.22	13 0.25	3 0.47	11 94	Granite gris G1 d'aspect sain
301.80	33 1.23	26 0.40	32 1.63	30 89	Granite très rubéfié
324.05	38 4.08	35 0.50	38 4.58	38 83	G.rubéfié à minéraux argileux
391.53	22 0.55	38 0.58	26 1.13	36 86	Granite rubéfié
402.80	15 0.42	31 0.46	22 0.88	29 89	Granite rubéfié
469.20	31 1.15	37 0.58	35 1.73	37 85	Granite rubéfié
513.88	10 0.32	28 0.40	18 0.72	23 91	Granite rubéfié cataclase
524.10	21 0.50	21 0.36	20 0.86	22 91	Granite rubéfié
535.29	17 0.44	3 0.12	8 0.56	2 97	Granite rubéfié
617.18	26 0.83	11 0.24	24 1.07	13 93	Granite rubéfié
643.73	30 1.12	18 0.30	30 1.42	18 92	Granite rubéfié cataclase
682.55	27 0.90	33 0.49	29 1.39	32 88	Remplissage de fracture (silice)
699.12	7 0.26	1 0.02	1 0.28	1 99	Mylonite de couleur sombre
730.30	29 0.95	12 0.25	27 1.20	12 93	Granite rubéfié
758.73	36 2.40	14 0.25	36 2.65	21 91	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
770.50	34 1.24	29 0.42	33 1.66	28 89	Granite rubéfié
784.20	35 1.30	15 0.27	31 1.57	17 92	Granite rubéfié
825.84	24 0.65	10 0.22	21 0.87	10 94	Granite rubéfié
854.63	19 0.46	8 0.20	15 0.66	9 95	Mylonite rouge
866.00	5 0.24	19 0.33	11 0.57	16 92	Granite gris G2 d'aspect sain
886.03	12 0.36	5 0.17	6 0.52	5 96	Granite gris G2 d'aspect sain
932.85	14 0.41	7 0.20	13 0.61	8 95	Granite rubéfié
966.40	11 0.33	24 0.37	17 0.70	20 91	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	16 0.43	6 0.20	14 0.63	7 95	Enclave de biotite
976.60	13 0.38	4 0.17	7 0.55	4 96	Mylonite rouge
981.60	19 0.46	9 0.21	16 0.67	6 95	Granite gris G2 d'aspect sain

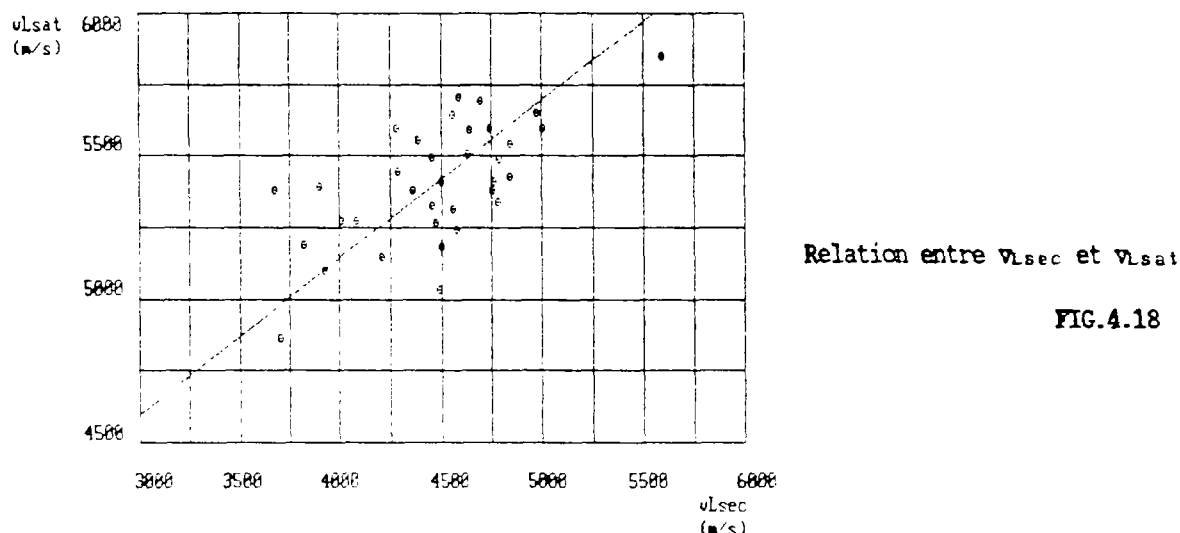
Tableau 4.11 : Décomposition de la porosité totale en porosité de pores n'_p et en porosité de fissures n'_f, d'après l'indice de qualité I_{q sat}.

(*) Les chiffres à gauche indiquent la position de la porosité dans sa série de mesure (par ordre croissant).(**) ou la position de l'indice de qualité dans sa série de mesure (par ordre décroissant).

Pour chaque faciès nous avons représenté sous forme d'histogramme :

- 1) la décomposition de n en n_f et n_p ,
- 2) la décomposition de n en n'_f et n'_p ,
- 3) la comparaison de $I_{q,f}$ et $I_{q,p}$.

4.3.3.2.2. - Interprétation des décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat en porosité de pores et en porosité de fissures d'après les indices de qualité $I_{q,f}$ et $I_{q,p}$:



Avant de passer à l'interprétation des résultats des décompositions de la porosité totale à partir des indices de qualité, nous présentons sur la fig.4.18 les vitesses longitudinales sèches et saturées dans un repère cartésien. Il n'est pas possible de tirer d'informations intéressantes de cette représentation.

L'examen des tableau 4.10 et 4.11 permet de mettre en évidence la prépondérance de la porosité de pores n_p sur la porosité de fissure n_f . On remarquera que la hiérarchie en porosité croissante est respectée entre les séries de mesures de la porosité totale n et de la porosité de pores n_p .

Parallèlement, la hiérarchie entre les séries des indices de qualité $I_{q,f}$ et des porosités de fissures est également respectée.

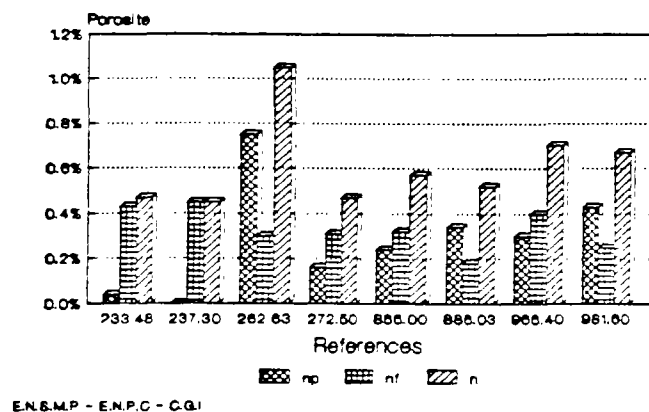
Le granite gris G1 ou G2 réputé sain, possède de manière générale les plus fortes porosités de fissures et donc de faibles indices de qualité. La porosité de fissures de l'échantillon 237.30 atteint la valeur remarquable de 100 % de la porosité totale qui est elle même très faible avec $n = 0.45$ %. L'indice de qualité de cet échantillon est de 62 %, ce qui le place, suivant la classification de TOURENCQ (cf. Tableau 4.9) dans la rubrique "*Médiocre - fortes altérations*".

La fig.4.19 est une représentation sous forme d'histogrammes de la décomposition de la porosité totale en fonction de $I_{q,f}$. On constate que sur 8 échantillons représentatifs des textures G1 et G2, 5 d'entre eux ont une porosité de fissures supérieure ou égale à la porosité de pores.

La décomposition de n en fonction de $I_{q,f}$ (cf.fig.4.20), montre une diminution de la part de porosité due aux fissures. Parallèlement, on constate une nette augmentation de l'indice de qualité $I_{q,p}$ par rapport à $I_{q,f}$ ce qui indique que la fissuration du matériau n'est pas colmatée (cf.fig.4.21).

Les mylonites ont une porosité de pores qui prédomine nettement sur la porosité de fissures (cf.fig.4.22) excepté pour l'échantillon 976.60 où les deux types de porosité sont équilibrés.

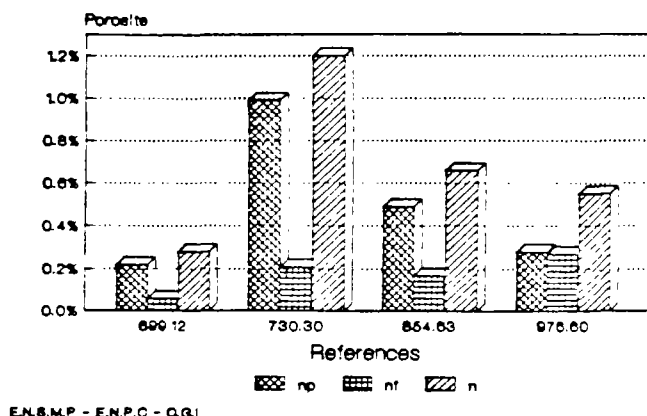
Granite sain - Decomposition de n en nf et np a partir de lqsec



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité lq_{sec} . Cas du granite sain.

FIG.4.19

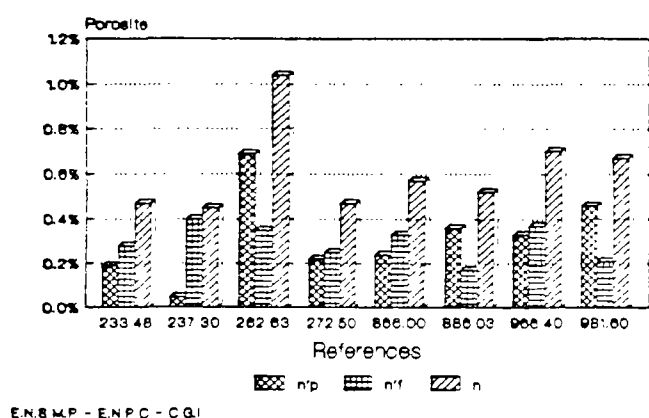
Mylonites - décomposition de n en nf, np a partir de lqsec



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité lq_{sec} . Cas des mylonites.

FIG.4.22

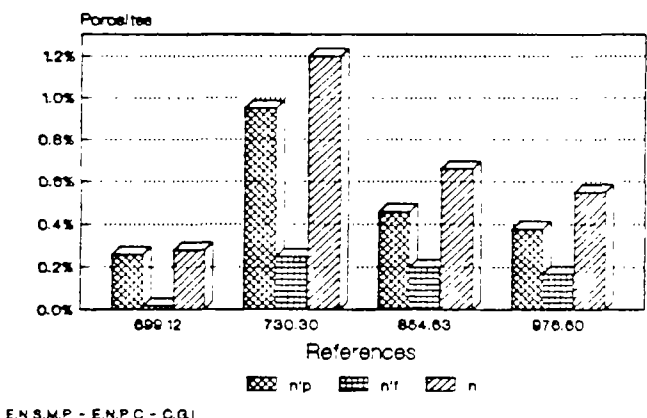
Granite sain - Decomposition de n en n'p et n'f a partir de lqsat



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité lq_{sat} . Cas du granite sain.

FIG.4.20

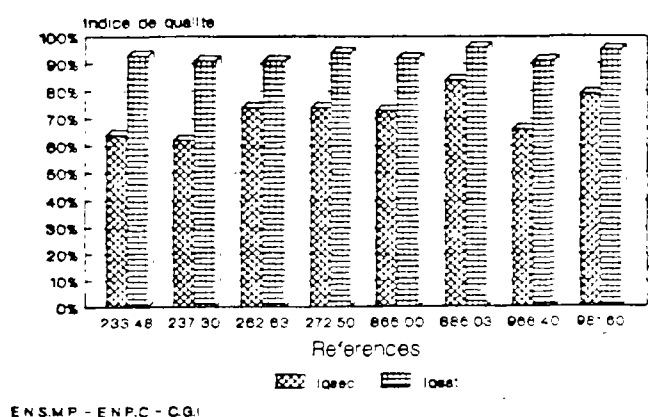
Mylonites - Decomposition de n en n'p et n'f a partir de lqsat



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité lq_{sat} . Cas des mylonites.

FIG.4.23

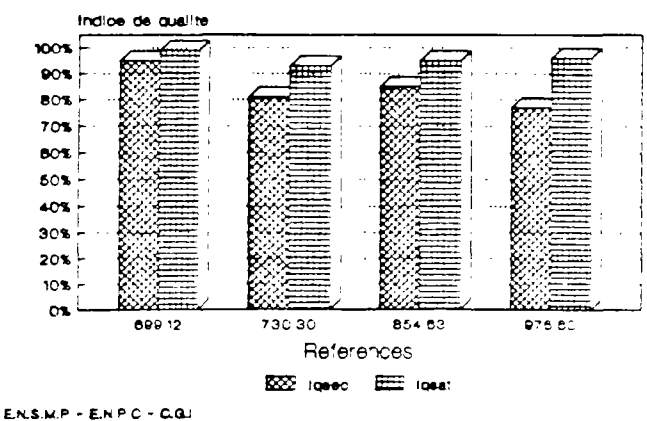
Granite sain Comparaison entre lqsec et lqsat



Comparaison des indices de qualité lq_{sec} et lq_{sat} . Cas du granite sain.

FIG.4.21

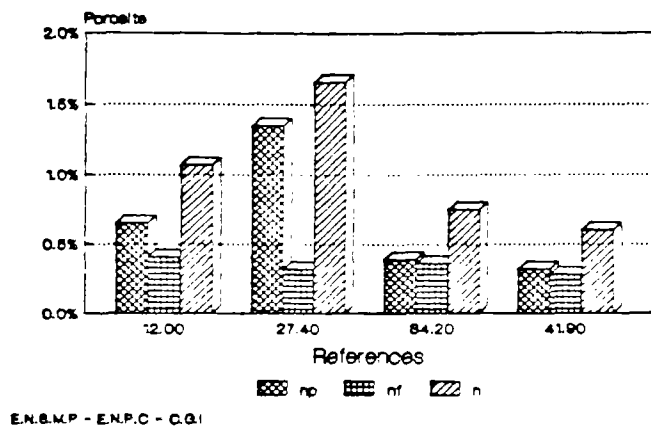
Mylonites Comparaison entre lqsec et lqsat



Comparaison des indices de qualité lq_{sec} et lq_{sat} . Cas des mylonites.

FIG.4.24

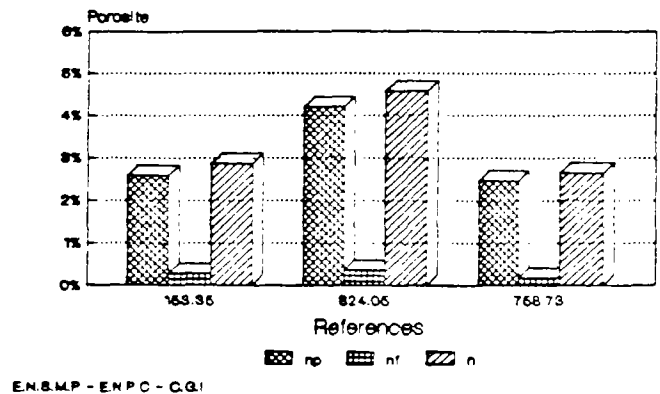
Granites rubefies; alteration meteorique
Decomposition en n_f , n_p d'apres I_{qsec}



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité I_{qsec} . Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.

FIG.4.25

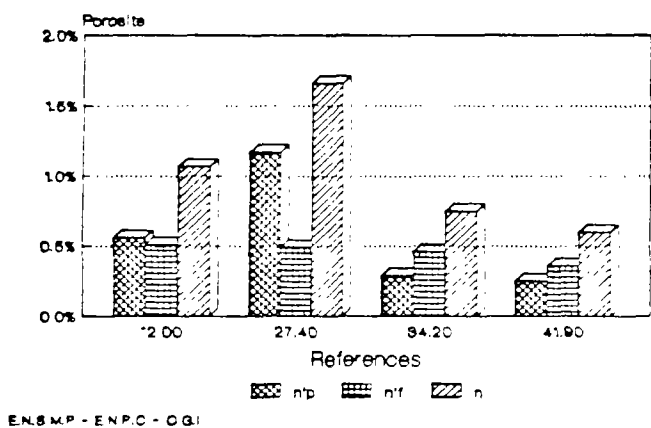
Granite rubefie a forte porosite ($n > 2$)
Decomposition de n en n_f et n_p a partir d' I_{qsec}



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité I_{qsec} . Cas du granite rubéfié à forte porosité ($> 2 \%$).

FIG.4.28

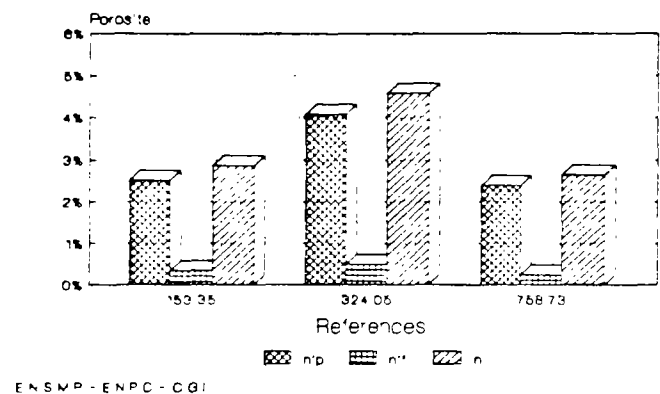
Granites rubefies; alteration meteorique
Decomposition en n'_f , n'_p d'apres I_{qat}



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité I_{qat} . Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.

FIG.4.26

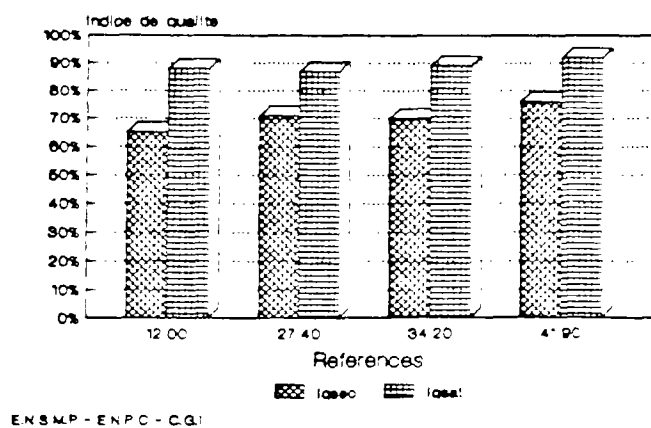
Granite rubefie a forte porosite ($n > 2$)
Decomposition de n en n'_f et n'_p
a partir d' I_{qat}



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité I_{qat} . Cas du granite rubéfié à forte porosité ($> 2 \%$).

FIG.4.29

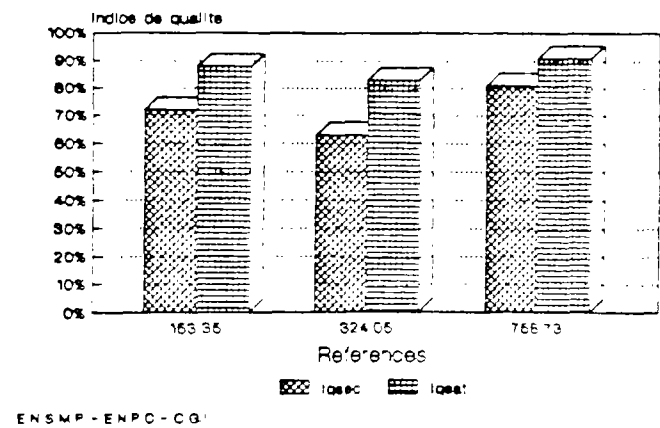
Granites rubefies; alteration meteorique
Comparaison entre I_{qsec} et I_{qat}



Comparaison des indices de qualité I_{qsec} et I_{qat} . Cas du granite rubéfié ayant subi une altération météorique.

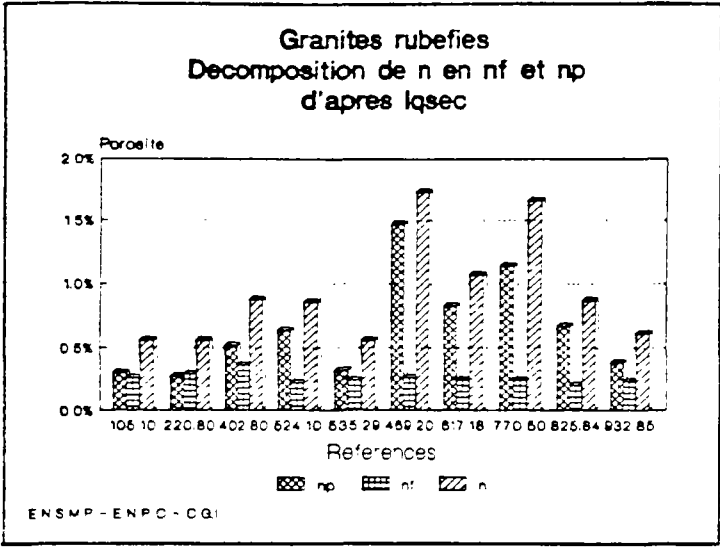
FIG.4.27

Granite rubefie a forte porosite ($n > 2$)
Comparaison entre I_{qsec} et I_{qat}



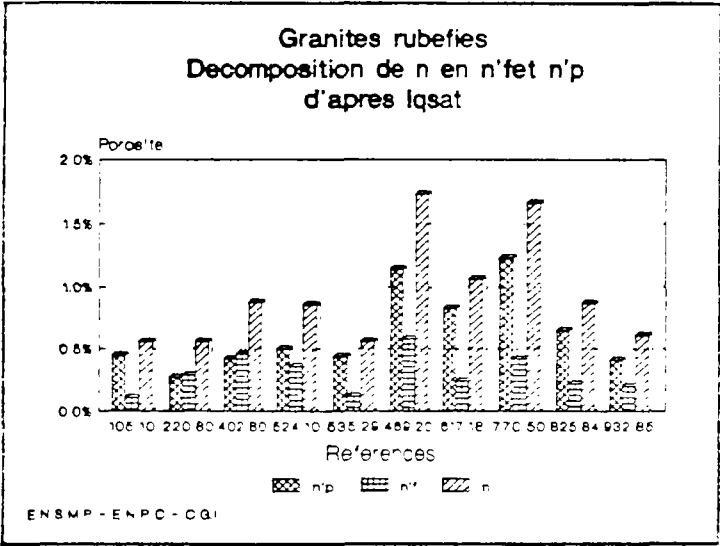
Comparaison des indices de qualité I_{qsec} et I_{qat} . Cas du granite rubéfié à forte porosité ($> 2 \%$).

FIG.4.30



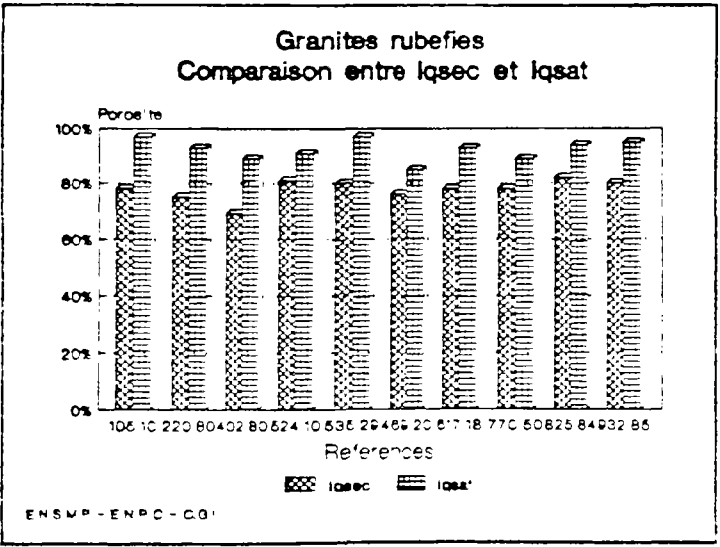
Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité Iq_{sec}. Cas du granite rubéfié.

FIG.4.31



Décomposition de la porosité totale du granite d'Auriat, en porosité de pores et en porosité de fissures, à partir de l'indice de qualité Iq_{sat}. Cas du granite rubéfié.

FIG.4.32



Comparaison des indices de qualité Iq_{sec} et Iq_{sat}. Cas du granite rubéfié.

FIG.4.33

La décomposition en fonction de $I_{q_{11}}$ montre une diminution de la part de porosité due aux pores sauf pour l'échantillon 976.60 (cf.fig.4.23). L'augmentation de $I_{q_{11}}$ par rapport à $I_{q_{10}}$ est généralement moins importante que dans le cas du granite sain (cf.fig.4.24). Cela témoigne de la recimentation de la fissuration.

Les granites rubéfiés ayant été repris par une altération de type météorique, ont une porosité totale n dont la décomposition suivant $I_{q_{11}}$ montre la prédominance de n_p sur n_f (cf.fig.4.25).

La décomposition suivant $I_{q_{11}}$ tend à inverser cette tendance pour les échantillons 34.20 et 41.90 où la porosité de fissures est supérieure à la porosité de pores (cf.fig.4.26). La comparaison entre $I_{q_{11}}$ et $I_{q_{10}}$ montre une augmentation de $I_{q_{11}}$ qui se stabilise vers 90 % ce qui est symptomatique d'une porosité de pores importante (cf.fig.4.27).

Dans le cas des granites rubéfiés à forte porosité, c'est à dire avec $n > 2$ %, la porosité de fissures est très minoritaire (cf.fig.4.28). La décomposition de n à partir de $I_{q_{11}}$ donne des résultats très proches de ceux obtenus à partir de $I_{q_{10}}$ (cf.fig.4.29). Parallèlement, on constate que $I_{q_{11}}$ est en général compris entre 80 et 90 % ce qui montre que la fissuration est largement colmatée par des produits où prédomine probablement la porosité de pores (argiles)(cf.fig.4.30).

Les fig.4.31 et 4.32 regroupent les décompositions de n effectuées sur 10 échantillons rubéfiés ($n < 2$ %) suivant $I_{q_{11}}$ et $I_{q_{10}}$. Les échantillons 105.10, 535.29 et 932.85 ont tous une porosité totale nettement inférieure à 1 %. On constate leurs $I_{q_{11}}$ sont toujours supérieurs à 90 % (cf.fig.33). Cela montre que la fissuration est pas entièrement colmatée.

Les échantillons 402.80, 469.20, 524.10, 770.50, 825.84 ont une porosité variant de 1 % à 2 % environ. Pour ceux-ci $I_{q_{11}}$ dépasse rarement 90 %. On peut donc penser que leur système de fissuration est largement colmaté.

Nous proposons dans le tableau 4.12 une synthèse des résultats obtenus.

Granite sain	: $n < 1$ % - fissuration ouverte
Mylonite	: $n < 1$ % - fissuration recimentée
Granite rubéfié :	
$n < 1$ % :	fissuration partiellement colmatée
$n > 1$ % :	fissuration colmatée
Granite rubéfié + altération météorique :	
$1.5 > n > 0.6$:	colmatage des fissures variable



Tableau 4.12 : Etat de la fissuration en fonction du faciès d'altération déduit de la comparaison des indices de qualité $I_{q_{sec}}$ et $I_{q_{sat}}$ ainsi que des décompositions de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures.

4.4. - Conclusion du chapitre 4 :

L'étude de la porosité du granite d'Auriat nous a permis de développer une méthode de mesure adaptée aux matériaux très peu poreux. Cette technique, dite des "courbes de séchage", permet de déterminer le poids humide de l'échantillon

saturé en quantifiant et en éliminant la quantité d'eau pelliculaire se trouvant sur la surface de l'échantillon.

Les porosités mesurées sur les éprouvettes de diamètre $\phi = 10$ mm sont sensiblement plus faibles que celles obtenues à partir des éprouvettes de diamètre $\phi = 20$ mm et ne sont pas représentatives de la roche. Il semble que ce déficit de porosité soit lié à la différence du nombre de grains constitutifs des deux types d'éprouvettes qui entraîne donc un effet d'échelle.

Il apparaît que le granite sain bien que très peu poreux ($n < 1\%$), possède une microfissuration non colmatée. Cette caractéristique se traduit par des indices de qualité médiocres (62 à 84 %). D'un point de vue qualitatif, les clichés de microscopie électronique à balayage confirment la "propreté" de l'espace poreux (cf. chapitre -2-).

En ce qui concerne le faciès d'altération de type rubéfaction, l'espace poreux est plus important mais les indices de qualité sont globalement meilleurs que ceux du granite sain. La fissuration est largement colmatée par les produits d'altération hydrothermaux et notamment par les produits argileux.

Certaines passées cataclasées, voire mylonitiques, éventuellement rubéfiées, ont des caractéristiques remarquables quant à leur très faible porosité. Quantitativement, ce faciès reste d'importance anecdotique.

Le granite rubéfié semble constituer, du point de vue de la porosité, une barrière géologique plus performante que le granite sain dans la mesure où la microfissuration, voie privilégiée des migrations, est colmatée par des produits d'altération pouvant éventuellement posséder des propriétés sorbantes vis à vis de certains radionucléides. Ce dernier point constitue un sujet d'étude complet qui dépasse le cadre de notre recherche.

- CHAPITRE 5 -

DETERMINATION DES SPECTRES DE POROSITE DU GRANITE D'AURIAT PAR POROSIMETRIE AU MERCURE ADAPTATION DE L'ESSAI POUR L'ETUDE DE MATERIAUX AYANT UNE FAIBLE POROSITE TOTALE (DE 0 A 3 %)

5.1. - Introduction :

5.1.1. - Principe de l'essai :

"La détermination de la dimension et de la répartition des pores à l'aide du porosimètre à mercure a été suggérée en 1921 par WASHBURGH et les premiers résultats expérimentaux ont été publiés par HANDERSON en 1940. Ils étaient relatifs à des échantillons de bauxite et d'argile. Elle a été ensuite développée par RITTER et DRAKE (1949) et appliquée par PURCELL et STROMBERG (1949) aux roches réservoir d'huile naturelle" (in C.A. JOUENNE, 1975, p 540). Elle a connu depuis un grand développement non seulement dans l'industrie du pétrole où les recherches ont été déterminantes, mais aussi dans l'industrie chimique (FREVEL et KESSLEY, 1963), dans l'industrie de la céramique (HILL 1960) et en sciences de la terre (GONI, RAGOT et SIMA 1968, ARNOULD, BOUSQUIE, PELLERIN 1980).

a) Le principe de fonctionnement du porosimètre à mercure repose sur la loi de Laplace qui peut s'exprimer comme suit :

Pour faire pénétrer le mercure dans un tube capillaire de rayon R, il est nécessaire d'appliquer une pression P_c donnée par la relation suivante :

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{R} \quad (5.1)$$

θ : angle de raccordement du ménisque
mercure-vapeur de mercure au capil-
laire : $\theta \approx 140^\circ$

σ : tension interfaciale mercure /
vapeur de mercure $\sigma = 0.48 \text{ N/m}$
($\sigma = 480 \text{ dynes/cm}$) à 25°C .

d'où

$$P_c (\text{KPa}) = \frac{7350}{R (\text{m})}$$

(5.2)

Cette formule reste vraie en remplaçant R par l'épaisseur e dans le cas d'une fissure. Un vide est caractérisé par son rayon d'accès r et non par son rayon réel (cf. fig. 5.1). Un pore ne se remplira complètement que si l'on exerce une pression capillaire égale à :

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (5.3)$$

bien que le volume le plus important ait
un rayon réel $R \gg r$.

b) L'essai consiste à faire pénétrer du mercure dans un échantillon de poids et de volume connus, préalablement désaéré, en exerçant des pressions croissantes. Pour chaque palier on mesure le volume de mercure qui a pénétré.

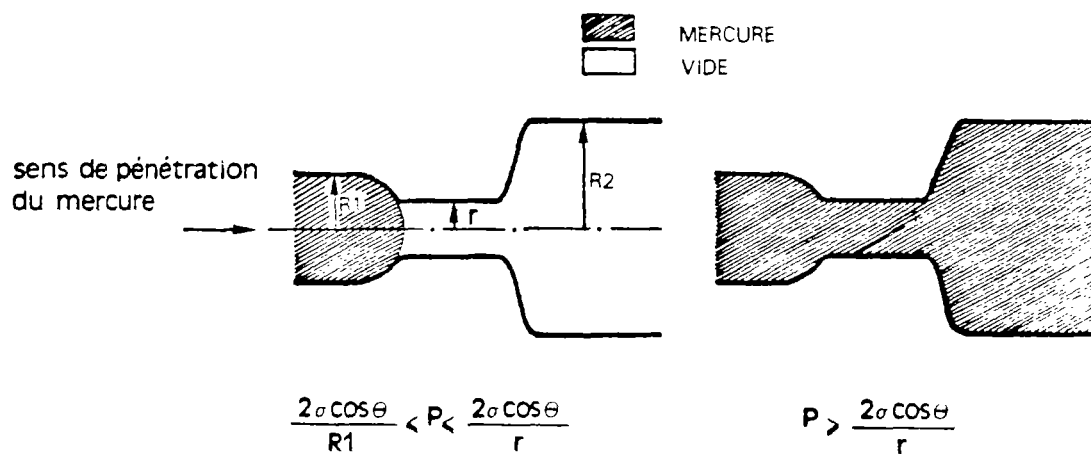


FIG.5.1: Notion schématique de rayon d'accès d'un pore (d'après P.BOUSQUIE, 1979)

Les seules forces qui s'opposent à la pression du mercure sont les forces capillaires. On obtiendra donc une courbe de pression capillaire du matériau considéré : volume de mercure injecté en fonction de la pression capillaire.

5.1.2. - Dispositif expérimental :

Les spectres porosimétriques ont été établis avec un porosimètre CARLO-ERBA 2000 WS (1984) qui autorise une gamme de pression de 0.1 à 200 MPa en fonctionnement automatique. Ceci permet de déterminer théoriquement le volume partiel des pores dont le rayon d'accès est compris entre 7.5 μm et 0.0037 μm (37 Å).

Le schéma de principe est représenté sur la fig. 5.2. L'échantillon est placé dans un dilatomètre que l'on remplit sous vide avec du mercure. Le dilatomètre est placé dans un autoclave rempli d'huile aux propriétés diélectriques connues. La pénétration du mercure dans l'échantillon sous l'effet de la pression se matérialise par une baisse de niveau dans le capillaire. La baisse de niveau est mesurée par un système capacitif où l'interface de mercure joue le rôle d'une des deux plaques chargées d'un condensateur.

5.1.3. - Choix des échantillons :

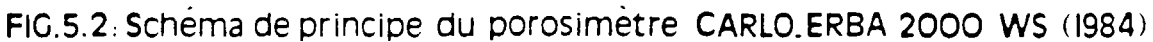
Les spectres porosimétriques ont été effectués sur 6 échantillons dont les faciès et les porosités sont réunis dans le tableau 5.1.

Les échantillons 237.30 (faciès G1) et 966.40 (faciès G2) sont représentatifs du granite gris à l'aspect sain. Les échantillons 220.80 (faciès G1) et 981.60 (faciès G2) sont les homologues rubéfiés des échantillons sains. On rappelle que la rubéfaction touche essentiellement la famille des feldspaths et plus particulièrement celle des plagioclases. L'examen comparatif des spectres porosimétriques relatifs aux échantillons rubéfiés et sains, devrait nous renseigner sur cette espèce minérale.

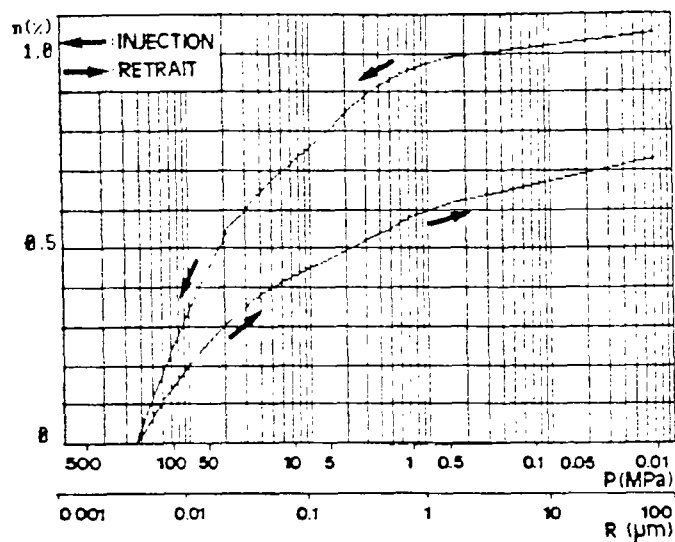
L'échantillon 153.35 a été sélectionné pour sa porosité relativement forte ($n = 2.22 \%$).

La fig.5.3 représente les courbes porosimétriques non corrigées.

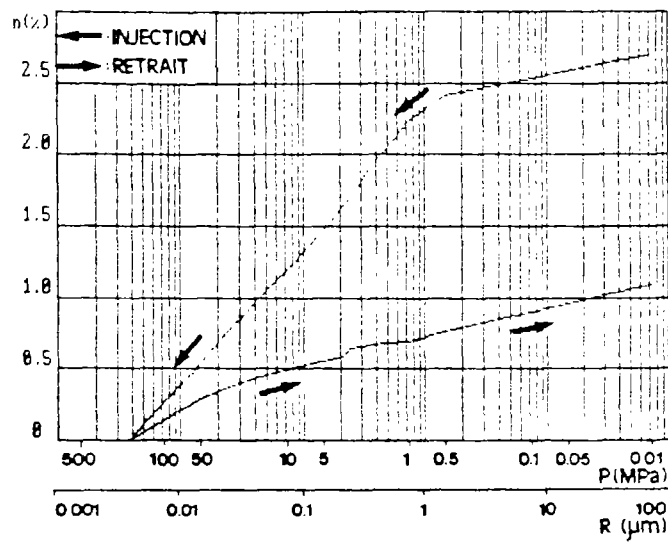
Nous avons reporté sur chaque graphe la première courbe d'injection et la première courbe de retrait.



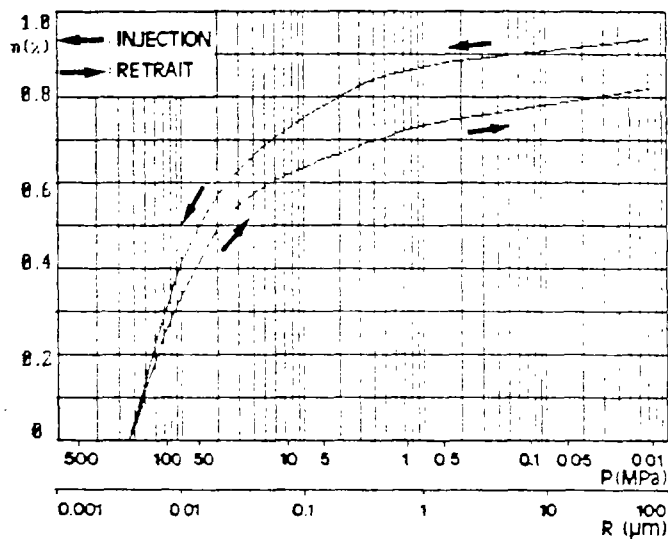
- circuit d'huile "haute pression"
 ⊖⊖ circuit de purge de l'huile en excès
 — circuit d'huile "basse pression"
 ---- circuit électrique



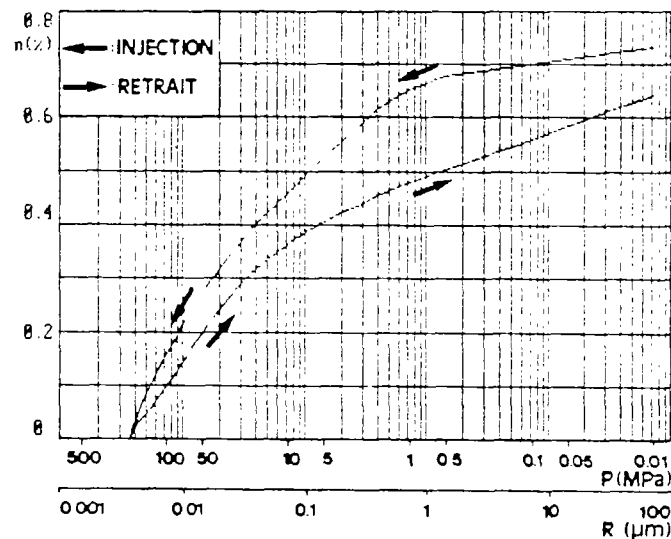
ECH.34.20



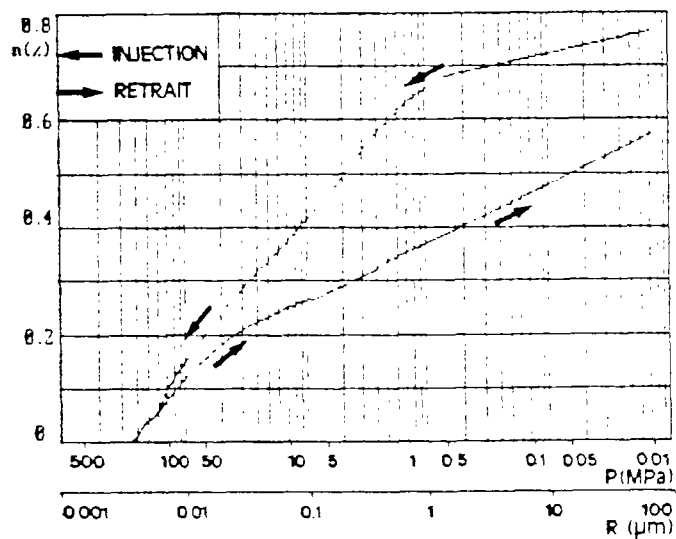
ECH.153.35



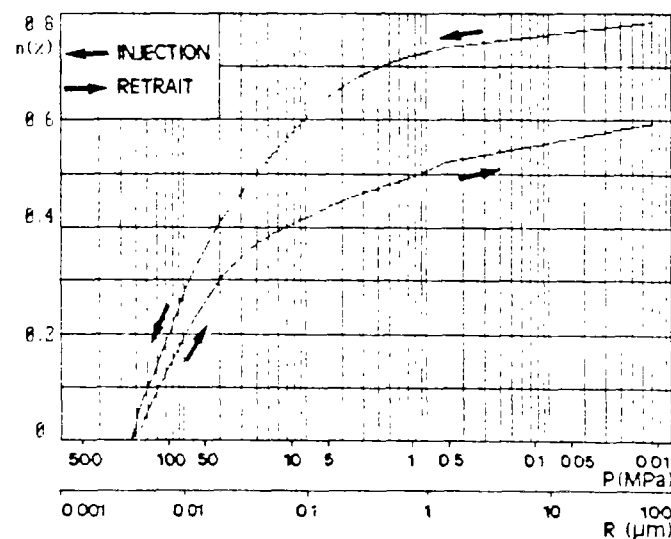
ECH.220.80



ECH.237.30



ECH.966.40



ECH.981.60

FIG.5.3: Spectres porosimétriques non corrigés de quelques échantillons du granite d'Auriat

Profondeur (m)	FACIES	n (%)
34.20	Granite rubéfié altération météorique G1	0.75
153.35	Granite rubéfié fissuration colmatée G1	2.22*
220.80	Granite rubéfié G1	0.56
237.30	Granite gris à l'aspect sain G1	0.45
966.40	Granite gris à l'aspect sain G2	0.70
981.60	Granite rubéfié G2	0.67

Tableau 5.1 : Caractéristiques des échantillons étudiés: profondeur, faciès d'altération, porosité totale à l'eau à partir des courbes de séchage.

* porosité à l'eau et le poids humide de l'échantillon est mesuré après essuyage avec une étoffe humide.

5.1.4. - Présentation générale de l'étude :

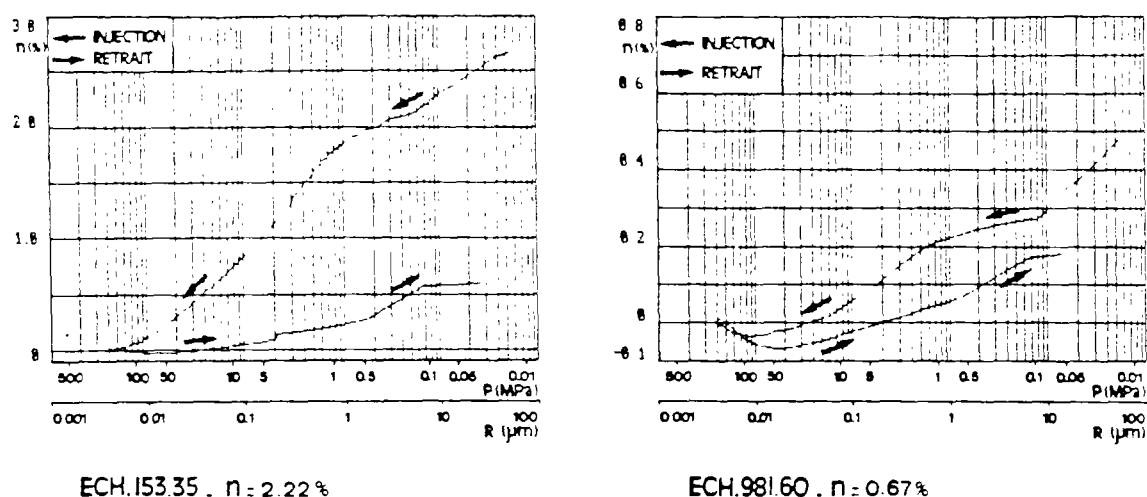


FIG.5.4: Spectres porosimétriques obtenus après corrections classiques sur deux échantillons de porosités totales très différentes

Lors d'un essai de porosimétrie au mercure, l'ensemble constitué par la matrice granitique, le mercure et le dilatomètre, a tendance à diminuer de volume lors de la montée en pression.

Les spectres de porosité au mercure sont généralement effectués sur des matériaux ayant une forte porosité (à partir de 3 % environ). Dans ces ordres de grandeur de porosité, on montre que si l'on appliquait les corrections de compressibilité relatives au mercure et à la matrice granitique celles-ci seraient très faibles, voire négligeables. La méthode de correction la plus couramment adoptée est celle de l'étalonnage. L'étalon est constitué d'un dilatomètre rempli d'un volume de mercure et d'un matériau réputé non poreux et de nature voisine de celle de l'échantillon testé (pyrex dans notre cas). On fait subir à ce "blanc" un essai porosimétrique. La courbe "d'injection" ainsi obtenue est censée quantifier la diminution de volume en fonction de la pression du matériau testé, du mercure et du dilatomètre. En ce qui concerne le granite d'Auriat, les spectres porosimétriques corrigés à partir de cette courbe d'étalonnage montrent qu'aux fortes pressions le mercure semble se retirer de l'échantillon ce qui est physiquement absurde.

Plus la porosité de l'échantillon est faible et plus ce phénomène est accentué. La fig.5.4 représente les spectres porosimétriques ainsi corrigés des échantillons 153.35 et 981.60.

Dans un premier temps, afin de corriger les spectres porosimétriques, nous avons étudié l'influence de la compression du mercure en fonction de la pression en utilisant les standards tirés de la littérature.

Parallèlement, nous avons tenté d'éliminer les effets perturbateurs dus à la diminution de volume du granite, en utilisant les coefficients de compressibilité déterminés à partir des essais mécaniques classiques. Les résultats obtenus n'étant pas satisfaisants, nous avons été amenés à mettre au point un essai permettant de quantifier les diminutions de volume du mercure et de la matrice granitique, dans les conditions physiques régnant au sein de l'autoclave du porosimètre. Lors de cette étape de l'étude, nous montrons que la déformation du dilatomètre est du même ordre de grandeur que celle du mercure et du granite, et que sa prise en compte permet de faire converger les valeurs des coefficients de compressibilité mesurés avec celles tirées de la littérature pour le mercure.

La dernière partie du travail a consisté à interpréter les spectres porosimétriques corrigés et à les corrélérer avec l'état d'altération des échantillons correspondants. Une série de prises de vue réalisées au microscope électronique à balayage complète l'étude (cf.chapitre 2, paragraphe 2.3.4).

5.2. - Tentative de correction directe à partir des coefficients de compressibilité issus de la littérature (mercure) et des essais mécaniques classiques (granite) :

5.2.1. - Définitions :

Le coefficient de compressibilité est déduit de la loi de Hooke qui régit les petites déformations des corps solides assimilés à des milieux continus dans le cadre de la théorie de l'élasticité.

Le coefficient de compressibilité s'exprime dans l'inverse d'une unité de pression :

$$K = - \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dP} \quad \text{pour une température donnée} \quad (5.4)$$

(avec $K > 0$ et $dV < 0$)

K : coefficient de compressibilité (inverse d'une unité de pression)

V : volume de l'échantillon (unité de volume)

Le module de compressibilité K_b ("bulk modulus") est l'inverse du coefficient de compressibilité K et s'exprime en unité de pression :

$$K_b = \frac{1}{K} \quad \text{pour une température donnée} \quad (5.5)$$

K_b : module de compressibilité (unité de pression)

5.2.2. - Correction de compressibilité du mercure :

Dans un premier temps, nous avons cherché à effectuer la correction de compressibilité du mercure à partir des modules de compressibilité fournis par la littérature.

Les tableaux 5.2, 5.3, 5.4, et 5.5 réunissent un choix de mesures des modules de compressibilité du mercure en fonction de la pression et à température constante, établis par plusieurs auteurs.

P(MPa)	9.2	26.4	40.9	53.2	65.2
Kb(GPa)	25.00	25.19	25.38	25.58	25.58

Tableau 5.2 : valeurs de Kb du mercure en fonction de la pression à 24.6°C (d'après DOLEZALEK et SPEIDELL, 1920)

P(MPa)	Kb(GPa)
0 à 10	25.51
10 à 20	25.77
20 à 30	26.04
30 à 40	26.32
40 à 50	26.60

P(MPa)	Kb(GPa)
0 à 97	24.88
290 à 387	27.03
581 à 678	30.30
1064 à 1161	39.21

Tableau 5.3 :
Kb du mercure en fonction
de la pression à 20°C (d'
après RICHARDS et STULL,
1904)

Tableau 5.4 :
Kb du mercure en fonction
de la pression à 22°C (d'
après BRIDGMAN, 1925)

P(MPa)	Kb(GPa)
1 à 50	26.3
50 à 100	26.3
100 à 150	27.0
150 à 200	27.8
200 à 250	28.6
250 à 300	29.4

Tableau 5.5 : Kb du mercure en fonction
de la pression à 22.8°C
(d'après CARNAZZI, 1903)

Les tables du Handbook of Chemistry and Physics, 1969, p.F.12, nous précisent que le module de compressibilité varie linéairement avec la pression et nous donnent les valeurs du coefficient de compressibilité pour 1 et 1000 atm.à 20°C (cf.tableau 5.6).

P = 0.1015 MPa	Kb = 25000 MPa = 25.00 GPa	pour le mercure à 20 °C
P' = 101.5 MPa	Kb' = 25640 MPa = 25.64 GPa	

Tableau 5.6 : Valeurs du module de compressibilité en fonction de la pression à 20°C (d'après MOELWYN-HUGHES, 1951).

A partir des formules (5.4),(5.5) et des données figurant dans le tableau 5.6, nous avons calculé dV/V en fonction de la pression. Pour ce faire, on détermine dans un repère P,Kb l'équation de la droite passant par les points (P,Kb) et (P',Kb'). On calcule les Kb puis les K=1/Kb, par intervalle de 0.5 MPa. Enfin, pour obtenir dV/V en fonction de la pression, on multiplie chaque K par la pression correspondante.

On constate que pour P = 200 MPa, dV/V = 0.76 % (cf.fig 5.5).

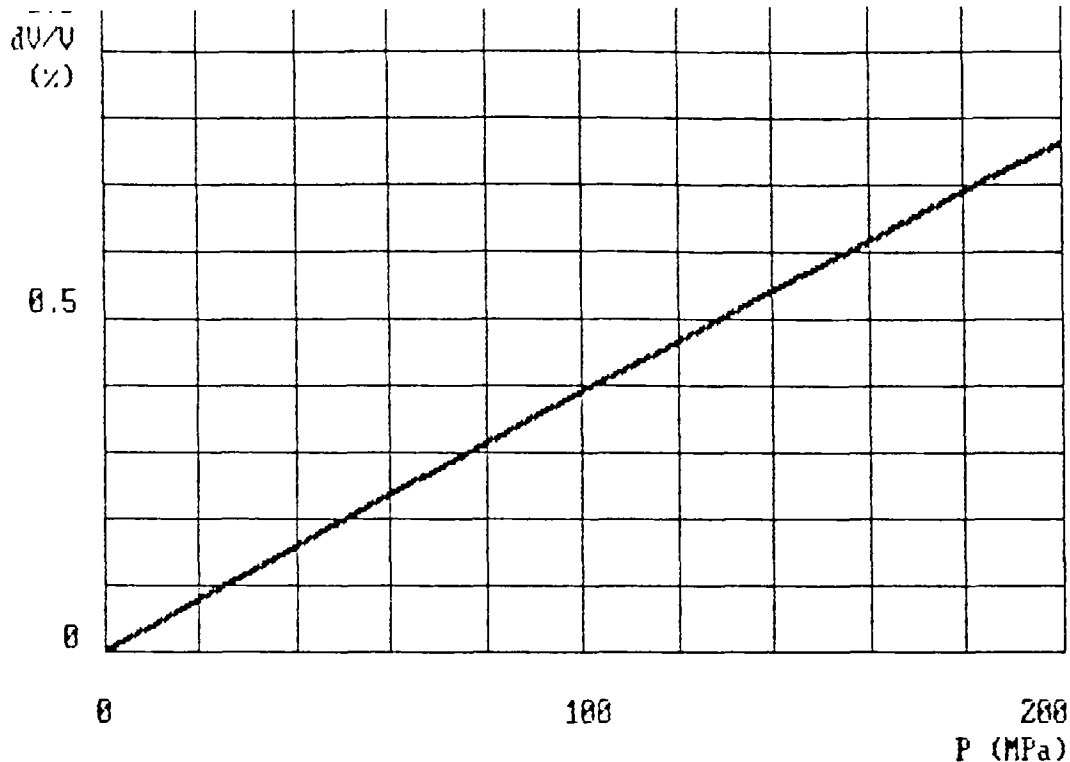


FIG.5.5: dV/V du mercure en fonction de la pression ($T = 20^\circ\text{C}$)
calculé à partir des données de MOELWYN HUGHES (1951)

Nous avons appliqué cette correction sur la courbe d'injection relative à l'échantillon 966.40.

La fig. 5.6.a représente dans un repère cartésien la part de diminution de volume due au mercure (2), la courbe d'injection non corrigée (1) et la courbe d'injection corrigée (3) en fonction de la pression.

Convention : les diminutions de volume dV seront toujours comptées positivement sur les figures.

La courbe d'injection corrigée de la compression du mercure décroît extrêmement rapidement à partir de 5 MPa. Au dessus de cette valeur, plus la pression augmente et plus le mercure semble se retirer de l'échantillon, ce qui ne peut correspondre à aucune réalité physique. La fig. 5.6.b représente le même phénomène en considérant cette fois-ci un repère semi-logarithmique où la porosité est exprimée en fonction du rayon d'accès aux pores. Dans ce type de représentation de la porosité cumulée à partir des pores les plus fins (37 Å), les porosités seraient négatives sur toute l'étendue du spectre !

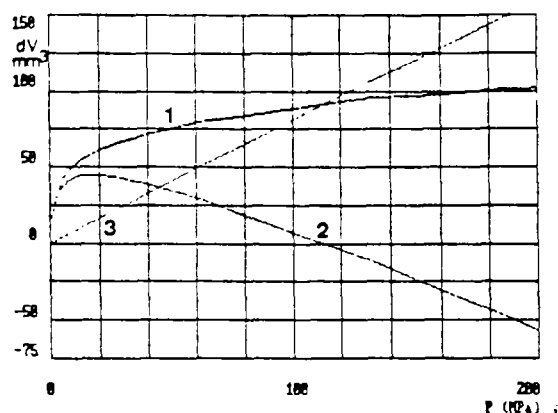
Dans le cas des granites très peu poreux, la correction de la courbe porosimétrique sur la base des données de compressibilité fournies par la littérature conduit donc à des résultats absurdes.

Ne pouvant la retenir, nous avons cherché à mesurer la diminution de volume du mercure dans les conditions régnant effectivement au sein de l'autoclave du porosimètre.

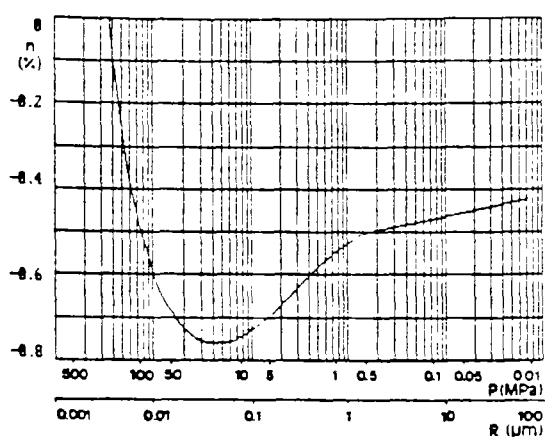
5.2.3. - Correction de compressibilité de la matrice granitique :

5.2.3.1. - Introduction :

Il est admis que le coefficient de compressibilité K des solides est au minimum de l'ordre de 10^{-6} par 0.1 MPa.



a. Représentation dans un repère cartésien de la part de diminution de volume due au mercure



b. Représentation dans un repère semi.log de la courbe d'injection corrigée

1_COURBE D'INJECTION BRUTE 2_COURBE D'INJECTION CORRIGEE 3_DIMINUTION DE VOLUME DUE AU MERCURE

FIG.5.6: CORRECTION DIRECTE DE LA COMPRESSIBILITE DU MERCURE APPLIQUEE A LA 1ère COURBE D'INJECTION DE L'ECHANTILLON 966.40 A PARTIR DES DONNEES DE MOELWYN HUGHES(1951)

Dans le cas d'un essai porosimétrique, on peut donc prévoir pour une pression de 200 MPa une diminution de volume de l'agrégat de 0.20 %.

Cette variation de volume est du même ordre de grandeur que les porosités totales mesurées sur le granite d'Auriat.

Nous avons donc estimé qu'il était nécessaire de tenir compte de la compressibilité du granite pour pouvoir exploiter les spectres porosimétriques de façon quantitative.

Des courbes de compressibilité ont été réalisées sur le granite d'Auriat en 1983 par le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique. Dans un premier temps, nous avons utilisé ces résultats pour effectuer les corrections des spectres porosimétriques. Par la suite, nous avons été amenés à définir un essai de compressibilité tenant compte des conditions physiques régnant effectivement au sein de l'autoclave du porosimètre.

Conventions de notation :

Le terme "matrice" désignera dans ce mémoire la partie solide de la roche. Elle n'englobe pas la porosité dite de pore, mais par contre, comprend la porosité fermée non accessible, par exemple les inclusions fluides.

5.2.3.2. - Correction de compressibilité du granite à partir des mesures de compressibilité du granite d'Auriat effectuées par le Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique :

5.2.3.2.1. - Présentation des résultats :

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de diamètre $\phi = 36$ mm et de hauteur $h = 80$ mm, correspondant à la profondeur 243.9 m (faciès de granite gris d'aspect sain, de type G1). La détermination de la variation de volume est faite dans l'essai triaxial, ou dans l'essai de compressibilité, à partir des mesures de déformation ϵ_1 et $\epsilon_2 = \epsilon_3$.

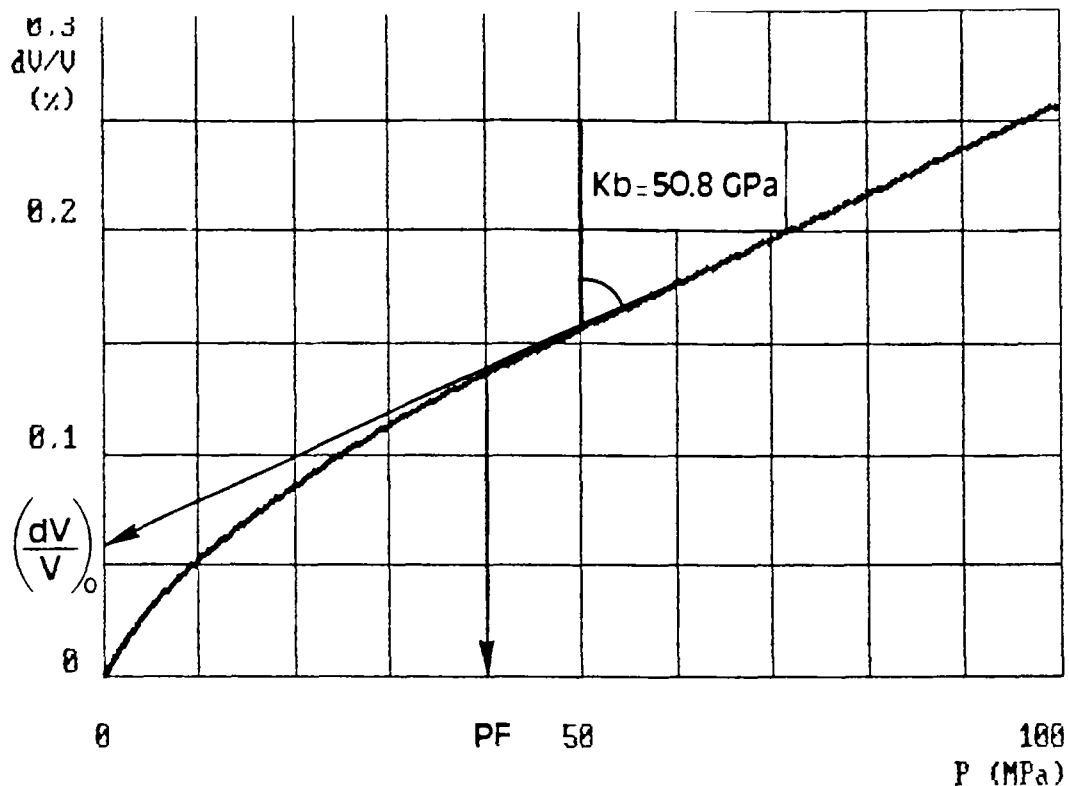


FIG.5.7: dV/V du granite en fonction de la pression. Essai réalisé sur l'échantillon 243.9. Granite gris à l'aspect sain (d'après document LMS)

Les échantillons sont équipés de jauges de déformation suivant deux directions perpendiculaires selon l'une ou l'autre des dispositions suivantes :

- deux jauges opposées en série dans chaque direction. On mesure ainsi indépendamment ϵ_1 et ϵ_2 (déformation parallèle et perpendiculaire à l'axe de la carotte).
- une jauge longitudinale et deux jauges transversales en série. On mesure alors directement la variation de volume de l'échantillon.

La fig.5.7 représente la courbe de compressibilité, c'est à dire $dV/V(P)$, effectuée sur l'échantillon 243.9.

L'extrapolation de la partie linéaire de la courbe de compressibilité permet d'accéder au volume initial des fissures $(dV/V)_0$ et à la pression de fermeture PF de toutes les fissures.

La pente de la partie linéaire de courbe est le module de compressibilité K_b de la partie solide de la roche, en supposant toutes les microfissures refermées.

5.2.3.2.2. - Commentaires - Correction des spectres porosimétriques :

La partie non linéaire de la courbe s'étendant de 0 à 40 MPa correspond au resserrement des fissures qui représente une diminution de 0.06 % du volume total de l'échantillon :

$$\begin{aligned} PF &= 40 \text{ MPa} \\ (dV/V)_0 &= 0.06 \% \end{aligned}$$

De 40 MPa à 100 MPa la courbe est linéaire et correspond exclusivement à la compression de la partie solide du granite.

A 100 MPa la diminution de volume englobant à la fois la fermeture des fissures et la compression de la partie solide du granite s'élève à 0.26 %.

Considérons maintenant seulement la partie linéaire de la courbe, c'est à dire la diminution de volume due à la partie solide de la roche.

A 100 MPa, la roche s'est comprimée de 0.2 % et si l'on extrapole la droite jusqu'à 200 MPa, de 0.4 % : le module de compressibilité correspondant est $K_b = 50.8 \text{ GPa}$.

Dans le cadre de l'essai porosimétrique, deux approches du comportement mécanique du granite sont envisageables :

- 1^{ère} approche : dans la première phase de l'essai, l'espace poreux est partiellement libre et il existe donc une différence de pression sensible avec le milieu extérieur que constitue le mercure. On peut alors prévoir un serrage des fissures. En réalité, cette phase de l'expérience est très complexe car l'injection du mercure se superpose au resserrement des fissures et s'y oppose. Dans ce cas, on prendra en compte la totalité de la courbe dV/V en fonction de P pour corriger les courbes d'injection.

Nous avons effectué la correction sur l'échantillon 966.40 (cf.fig.5.8.a). Nous avons représenté dans un repère cartésien la part de diminution de volume due au serrage des fissures et à la compressibilité du granite, la courbe d'injection non corrigée et la courbe d'injection corrigée (la diminution de volume est comptée positivement). Parallèlement, nous avons fait figurer la courbe d'injection corrigée dans la représentation la plus répandue, c'est à dire dans un repère semi-logarithmique où la porosité cumulée est exprimée en fonction du rayon d'accès aux pores (cf.fig.5.8.b).

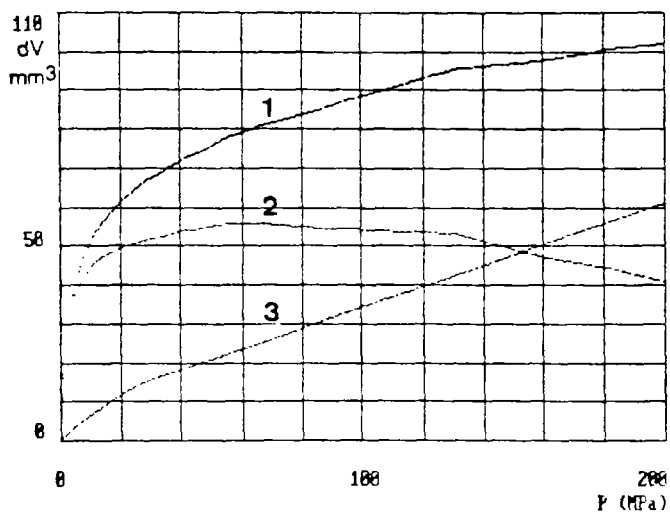
On constate qu'à partir de 50 MPa environ le mercure ne rentre plus dans l'échantillon et semble se retirer à partir de 70 MPa. On peut donc en conclure que cette correction n'est pas adaptée à ce type d'essai. Nous pouvons ajouter que si l'on superposait la correction relative à la compressibilité du mercure, le retrait apparent du mercure aurait lieu à une pression beaucoup plus basse.

- 2^{ème} approche : on fait l'hypothèse que le mercure occupe rapidement le système de fissuration et s'oppose donc à sa fermeture. Dans ce contexte, on peut considérer que la roche est soumise à un champ de contraintes hydrostatiques dès le début de l'essai. *A priori*, le système de fissuration n'a pas lieu de se resserrer. Pour corriger la courbe d'injection de mercure, on ne prendra en compte que la partie linéaire de la courbe de compressibilité de la roche, c'est à dire la diminution de volume due à la partie solide du granite.

On constate qu'à partir de 60 MPa environ (cf.fig.5.9.a et 5.9.b), le mercure semble se retirer de l'échantillon. Bien que la diminution de volume attribuée au serrage des fissures ait été supprimée, la correction ne donne pas satisfaction.

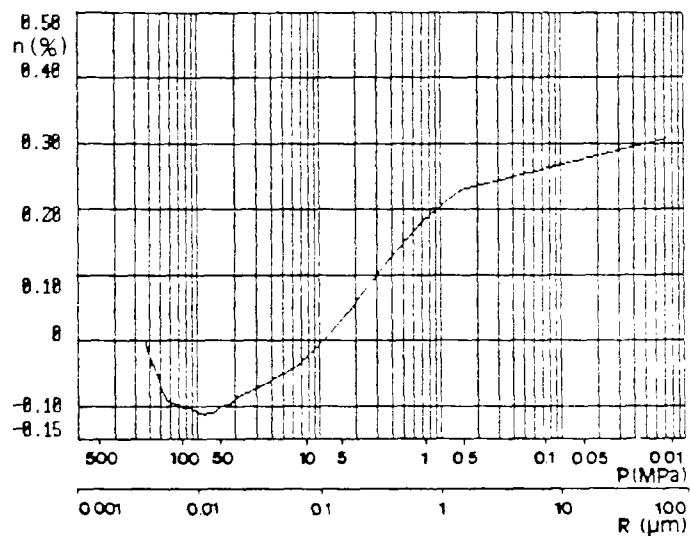
Quelque soit le type de correction de compressibilité du granite que nous avons considéré, il semble que la compressibilité de la roche soit surestimée.

Le principe même de l'essai classique de compressibilité et les conditions dans lesquelles il est effectué, peuvent éventuellement expliquer l'échec de ces deux tentatives de correction. Afin de vérifier cette hypothèse, nous nous sommes proposé de quantifier la compressibilité de la matrice dans le même environnement physique que celui qui existe dans l'autoclave du porosimètre.



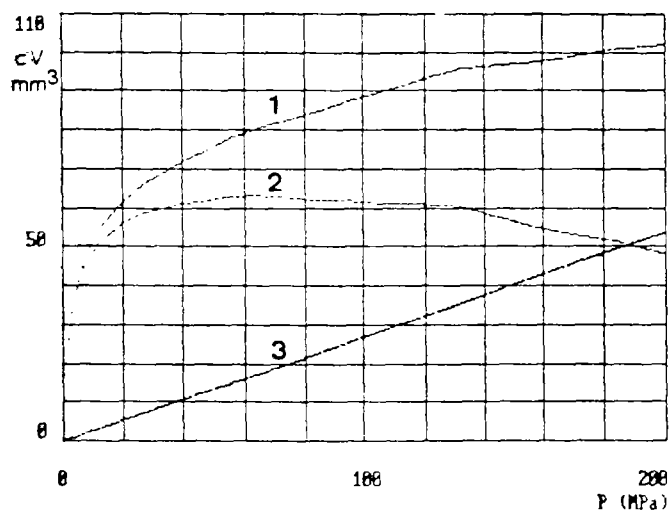
REPRESENTATION a

1 _ COURBE D'INJECTION BRUTE 2 _ COURBE D'INJECTION CORRIGEE 3 _ DIMINUTION DE VOLUME DUE AU GRANITE



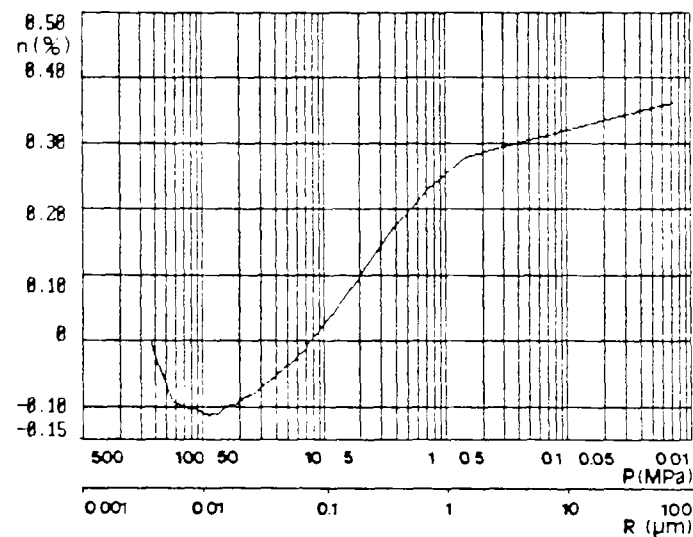
REPRESENTATION b

FIG.5.8: CORRECTION DIRECTE DE LA COURBE D'INJECTION DE L'ECHANTILLON 966.40 A PARTIR DE LA TOTALITE DE LA COURBE DE COMPRESSIBILITE DU GRANITE DETERMINEE PAR LE LMS



REPRESENTATION a

1 _ COURBE D'INJECTION BRUTE 2 _ COURBE D'INJECTION CORRIGEE 3 _ DIMINUTION DE VOLUME DUE AU GRANITE



REPRESENTATION b

FIG.5.9: CORRECTION DIRECTE DE LA COURBE D'INJECTION DE L'ECHANTILLON 966.40 A PARTIR DE LA PARTIE LINEAIRE DE LA COURBE DE COMPRESSIBILITE DU GRANITE DETERMINEE PAR LE LMS

5.2.4. - Conclusion :

Les corrections des spectres porosimétriques à partir des coefficients de compressibilité tirés de la littérature (mercure) ou déterminés à partir d'essais mécaniques classiques (granite) semblent systématiquement trop importantes. Nous avons alors estimé qu'une quantification expérimentale de ces paramètres effectuée dans les conditions de l'essai porosimétrique, permettrait d'approcher de plus près la réalité physique de l'essai et d'expliquer pourquoi nous ne pouvons pas corriger directement les spectres porosimétriques à partir des coefficients de compressibilité théoriques.

5.3. - Correction à partir des coefficients de compressibilité mesurés - Relation entre les coefficients de compressibilité mesuré et absolu :

5.3.1. - Correction de compressibilité du mercure - Notions de coefficient de compressibilité apparent (mesuré) et de coefficient de compressibilité absolu :

Nous avons effectué plusieurs courbes de compressibilité du mercure sur le porosimètre CARLO-ERBA 2000 WS. L'essai consiste à remplir un dilatomètre avec un volume connu de mercure puis à effectuer une montée en pression suivi d'une détente. Deux de ces courbes, correspondant à deux montées en pression, sont représentées sur la fig.5.10. Nous constatons que bien que ces essais aient été réalisés dans les mêmes conditions, les courbes obtenues ne sont jamais parfaitement identiques. Elles sont cependant très proches les unes des autres et très différentes de celle de la fig.5.5 (courbe établie à partir des données de la littérature).

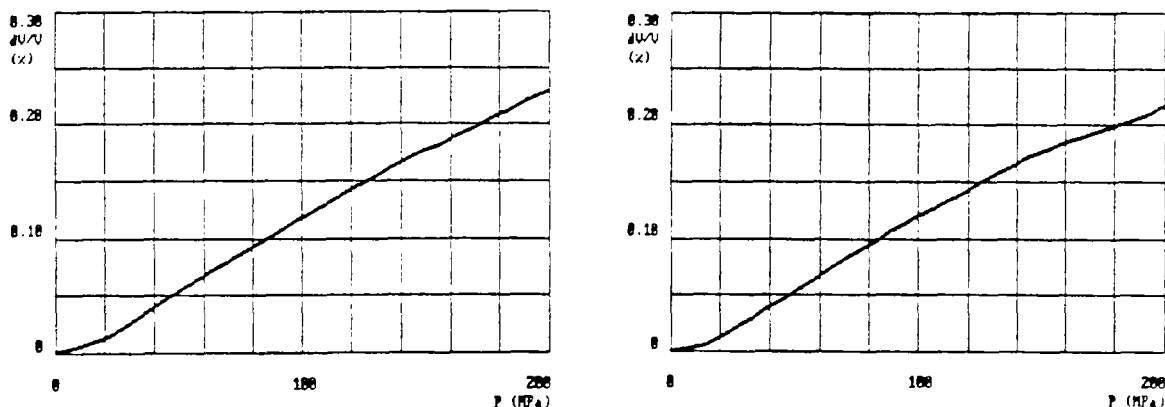


FIG.5.10: EXEMPLE DE DEUX MONTEES EN PRESSION REALISEES SUR UN DILATOMETRE REMPLI DE MERCURE (POROSIMETRE CARLO.ERBA 2000 WS)

Pour une pression de 100 MPa, dV/V varie de 0.14 à 0.17 % ce qui correspond à une variation de volume trois fois plus faible que celle tirée de la littérature (0.45 %).

Nous avons effectué la même manipulation avec le porosimètre CARLO-ERBA 1500. Bien que la courbe obtenue ne soit pas rigoureusement superposable avec les précédentes, les ordres de grandeurs sont respectés. Ainsi, à 200 MPa, $dV/V = 0.10$ %.

Cette manipulation ayant été effectuée sur le même matériel (CARLO-ERBA 1500) que celui qui a servi pour les essais suivants sur la compressibilité du granite, nous avons utilisé les données qui ont servi à établir la courbe représentée sur la fig.5.11, afin de corriger les courbes porosimétriques.

Les caractéristiques du dilatomètre ayant servi à cette manipulation sont réunies dans le tableau 5.7.

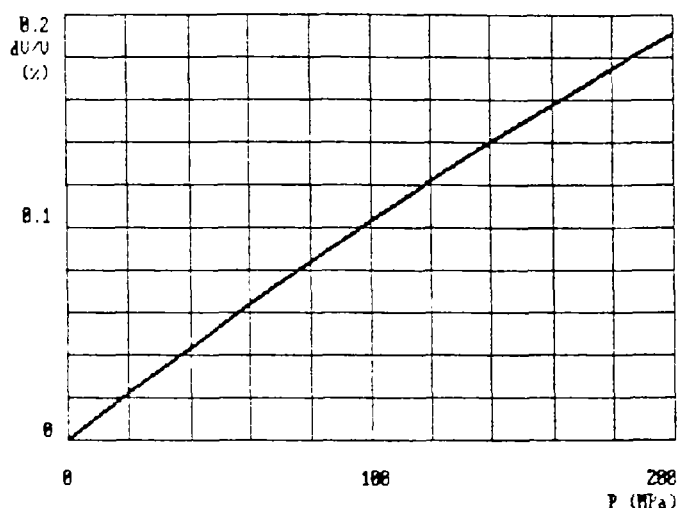


FIG.5.11: Courbe de montée en pression effectuée sur un dilatomètre rempli de mercure, retenue pour corriger les spectres porosimétriques (POROSIMETRE CARLO.ERBA 1500)

Diamètre du capillaire	: $\phi = 3.484 \text{ mm}$
Volume total du dilatomètre	: $V_{Hg} = 85525 \text{ mm}^3$
Volume du mercure	: $VD_{Hg} = 85525 \text{ mm}^3$

Tableau 5.7 : Caractéristiques du dilatomètre utilisé pour mesurer la diminution de volume du mercure en fonction de la pression.

Les valeurs des coefficients de compressibilité établies à partir de nos données sont reproductibles quels que soient les modèles de porosimètres (CARLO-ERBA 1500 ou 2000) et les opérateurs (les essais ont été réalisés par 2 opérateurs). La différence observée entre nos résultats et ceux de la littérature ne pouvant être imputée à une erreur expérimentale, nous avons recherché dans la littérature les modes opératoires qui ont servi à établir les modules de compressibilité figurant dans les tables.

La mesure de la compressibilité d'un fluide est généralement effectuée à l'aide d'un piézomètre en verre. Le fluide est enfermé dans une cellule reliée à un capillaire surmontée d'une colonne de mercure. La cellule et le capillaire sont soumis à une même pression intérieure et extérieure. Lors de la montée en pression, le ménisque de mercure baisse de niveau dans le capillaire au fur et à mesure que le fluide se comprime.

P.W.BRIDGMAN (1949) souligne le fait que dans la deuxième partie du XIX^{ème} siècle, il y eut une controverse au sujet de la déformation du piézomètre, considéré homogène et isotrope, lorsqu'il était soumis à une pression hydrostatique uniforme à l'intérieur et à l'extérieur.

Dans une communication à l'Académie des Sciences de Paris (1889), E.H.AMAGAT donne un coefficient de compressibilité du mercure égal à $3.92 \cdot 10^{-1}/\text{GPa}$ pour une pression de 50 atm. Il compare cette valeur avec celles de REGNAULT (1847) ($K = 3.52 \cdot 10^{-1}/\text{GPa}$), de GRASSI (1851) ($K = 2.95 \cdot 10^{-1}/\text{GPa}$), de TAIT (1881) ($K = 3.60 \cdot 10^{-1}/\text{GPa}$) et de MM.AMAURY et DESCAMPS (1869) ($K = 1.87 \cdot 10^{-1}/\text{GPa}$) et ajoute : "Le nombre de MM.Amaury et Descamps qui s'écarte tant des autres est le résultat d'expériences faites avec soin ; malheureusement la méthode est notoirement inexacte.

Elle suppose en effet que la variation de volume des parois d'un piézomètre comprimé par l'intérieur est négligeable, tandis qu'en réalité elle est du même ordre de grandeur que la correction qu'il s'agit d'effectuer ; on peut s'en assurer facilement au moyen des formules générales de l'élasticité..."

En effet, dans le cas de la détermination de la compressibilité du mercure, les modules de compressibilité du fluide et du pyrex sont du même ordre de grandeur : $K_{B_1} \approx 25$ GPa (MOELWYN-HUGHES, 1951) et $K_{B_{pyrex}} \approx 33$ GPa (H.SCHOLZE, 1974). La déformation du contenant n'est alors plus négligeable par rapport à celle du fluide. Concrètement, cela se traduit par le fait que les données expérimentales ne sont pas directement exploitables et que l'on ne mesure qu'une compressibilité apparente du fluide.

Les premières tentatives de correction permettant d'accéder au module de compressibilité absolu du mercure et donnant des résultats satisfaisants, furent effectuées par E.H.AMAGAT (1889), en appliquant la théorie de l'élasticité.

P.W.BRIDGMAN (1949) puis M.DIAZ PEÑA (1959) ont explicité clairement les calculs de correction que nous avons adaptés à notre dispositif expérimental :

Au début de l'essai, on considère que le volume de mercure peut se décomposer de la manière suivante :

$$V_{Hg} = VD_{Hg} + h \cdot S \quad (5.6)$$

V_{Hg} : volume de mercure au début de l'essai
 VD_{Hg} : volume de la cellule du dilatomètre
 h : hauteur initiale du mercure dans le capillaire
 S : section du capillaire

Afin de faire apparaître les coefficients de compressibilité du mercure et du dilatomètre, on effectue la dérivée partielle de l'expression (5.6) par rapport à la pression P et on divise par V_{Hg} :

$$\frac{\delta V_{Hg}}{\delta P} \cdot \frac{1}{V_{Hg}} = \frac{1}{V_{Hg}} \cdot \frac{\delta VD_{Hg}}{\delta P} + \frac{S}{V_{Hg}} \cdot \frac{\delta h}{\delta P} + \frac{h}{V_{Hg}} \cdot \frac{\delta S}{\delta P} \quad (5.7)$$

Les expressions des coefficient de compressibilité du mercure et du dilatomètre sont :

$$K_{Hg} = - \frac{1}{V_{Hg}} \cdot \frac{\delta V_{Hg}}{\delta P} \quad (5.8) \quad \text{et} \quad K_D = - \frac{1}{VD_{Hg}} \cdot \frac{\delta VD_{Hg}}{\delta P} \quad (5.9)$$

D'autre part, il est possible de simplifier le terme en $\delta S / \delta P$. Sachant que $S = S_0 \cdot (1 - 2/3 \cdot K_D \cdot P)$ (avec K_D coefficient de compressibilité du dilatomètre en pyrex), il vient :

$$\frac{\delta S}{\delta P} = - \frac{2}{3} \cdot S \cdot K_D \quad (5.10)$$

En introduisant les expressions (5.8), (5.9) et (5.10) dans la relation (5.7), on obtient :

$$K_{Hg} = \frac{VD_{Hg}}{V_{Hg}} \cdot K_D - \frac{S}{V_{Hg}} \cdot \frac{\delta h}{\delta P} + \frac{h}{V_{Hg}} \cdot \frac{2}{3} \cdot S \cdot K_D \quad (5.11)$$

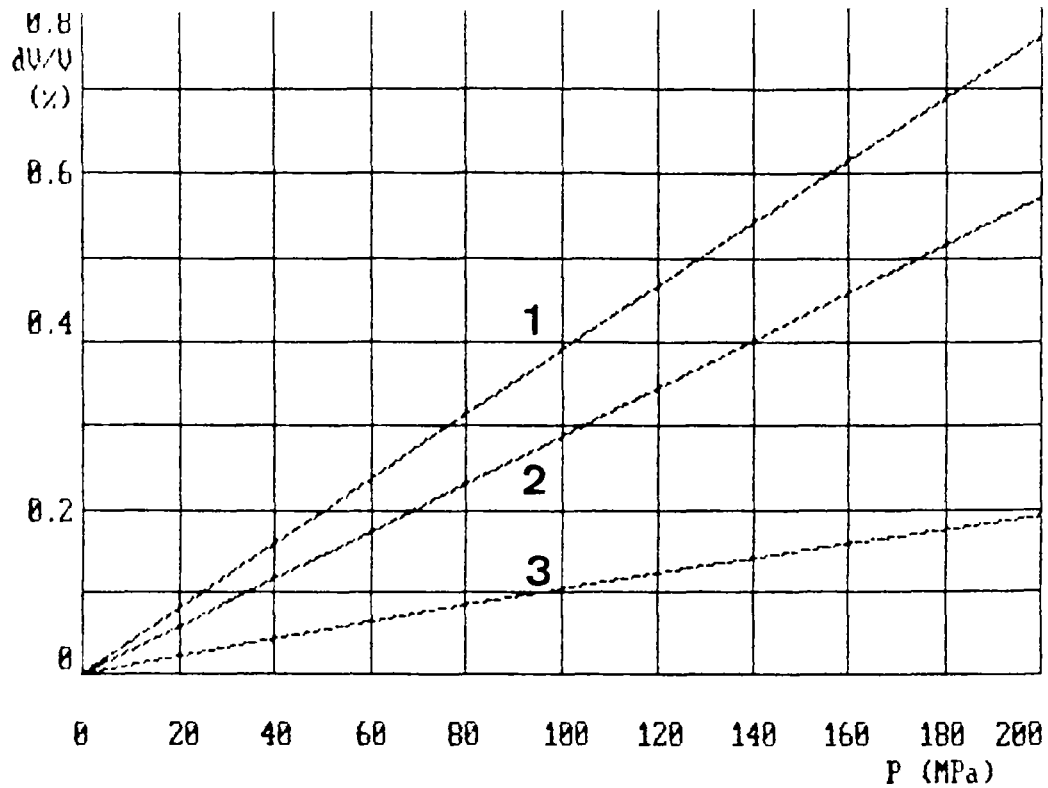


FIG.5.12 : Superposition et différence des courbes $dV/V(P)$ du mercure, déterminées à partir de nos données et de celles de MOELWYN-HUGHES (1951)

- 1. : $dV/V(P)$ Hg d'après MOELWYN-HUGHES
- 2. : $dV/V(P)$ Hg d'après nos mesures
- 3. : différence entre les courbes 1 et 2 soit : $dV/V(P)$ du dilatomètre en pyrex

En remplaçant dans l'expression (5.11) VD_1 par $VD_1 = V_1 - h \cdot S$ il vient :

$$K_{Hg} - K_D = - \underbrace{\frac{S}{V_{Hg}} * \frac{\delta h}{\delta P}}_1 - \underbrace{\frac{1}{3} * \frac{h * S * K_D}{V_{Hg}}}_2 \quad (5.12)$$

2 est négligeable devant 1 dont le numérateur peut s'exprimer comme suit :

$$S * \delta h = \delta V \quad (5.13)$$

avec δV : diminution de volume mesurée du mercure (ou diminution apparente du volume de mercure).

D'où l'expression :

$$K_{Hg} = - \frac{\delta V}{V_{Hg}} * \frac{1}{\delta P} + K_D \quad (5.14)$$

Quand le dilatomètre est soumis à une pression extérieure et intérieure égale, la diminution de son volume est la même que celle qu'il aurait subi s'il était entièrement constitué de verre.

Dans ces conditions $K_v = K_r$ (coefficient de compressibilité du verre), d'où l'expression finale du coefficient de compressibilité absolu du mercure :

$$K_{Hg} = - \frac{\delta V}{V_{Hg}} * \frac{1}{\delta P} + K_v \quad (5.15)$$

La fig.5.12 représente les $dV(P)$ du mercure déterminés d'après les données de MOELWYN-HUGHES (1951) ($dV_{(1)}(P)$) et d'après nos mesures ($dV_{(2)}(P)$). Nous avons complété cette représentation en traçant la courbe correspondant à la différence des deux premières. Le tableau 5.8 récapitule les données chiffrées (converties en modules et coefficients de compressibilité) relatives à ces courbes, pour quelques valeurs de pression et pour une température de 35°C.

On constate que la courbe $dV_{(1)-(2)}(P)$ est la même que celle du verre, ce qui correspond à un module de compressibilité variant de 34.63 GPa (à 0.1 MPa) à 34.98 GPa (à 200 MPa).

P (MPa)	K_{Hg} (/GPa) *10 ² (1)	K_{bHg} (GPa)	$K_{Hg(2)}$ (/GPa) *10 ² (2)	$K_{bHg(2)}$ (GPa)	$K_{Hg} - K_{Hg(2)}$ (/GPa)*10 ² (3)	$K_{(Hg-Hg(2))}$ (GPa)
0.1	4.008	24.95	1.121	89.23	2.887	34.63
10	3.998	25.01	1.111	90.00	2.887	34.64
50	3.958	25.27	1.074	93.08	2.884	34.68
100	3.909	25.58	1.032	96.92	2.887	34.63
150	3.861	25.90	0.992	100.76	2.869	34.85
200	3.815	26.21	0.956	104.61	2.859	34.98

Tableau 5.8 : Coefficients et modules de compressibilité du mercure en fonction de la pression.

(1) : K_{Hg} = coefficient de compressibilité absolu du mercure d'après MOELWYN-HUGHES (1951).

(2) : $K_{Hg(2)}$ = coefficient de compressibilité apparent déterminé à partir de nos mesures.

(3) : $K_{Hg} - K_{Hg(2)}$ = différence entre les 2ème et 4ème colonnes.

Nos résultats sont très proches de ceux de M.DIAZ PEÑA (1959) qui a déterminé le coefficient de compressibilité absolu du mercure à partir de ses propres mesures de compressibilité apparente du mercure auxquelles il a ajouté le coefficient de compressibilité du verre établi par P.W.BRIDGMAN (1925) (cf.tableau 5.9).

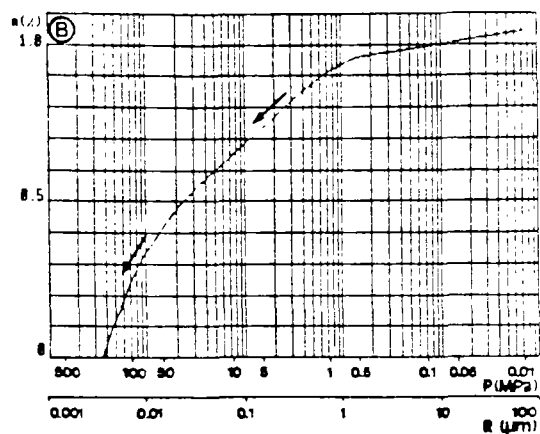
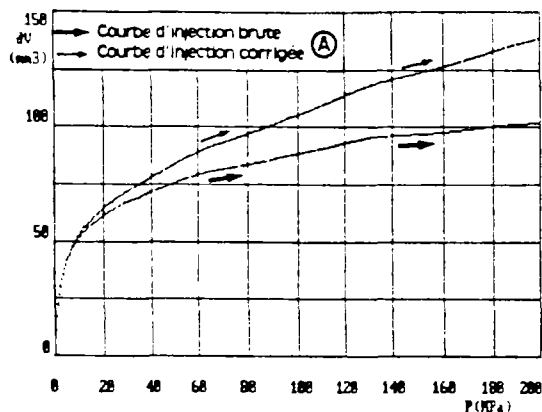


FIG.5.13 : Correction de la courbe d'injection de l'échantillon 966.40 suivant l'expression :

$$|dV_{\text{corrigé}}(P)| = |dV_{\text{mesuré}}(P)| - \left[K_{Hg}(P) \cdot V_{Hg} + K_v(P) \cdot V_D \right] \cdot P$$

(a) Représentation de $dV_{\text{mesuré}}(P)$ et de $dV_{\text{corrigé}}(P)$ dans un repère cartésien.

(b) Représentation du spectre porosimétrique corrigé

T (°C)	K_{Hg} (/GPa) $\cdot 10^2$ (1)	K_{Hg} (GPa)	$K_{Hg} - K_g$ (/GPa) $\cdot 10^2$ (2)	$K_{b(Hg-g)}$ (GPa)	K_g (/GPa) $\cdot 10^2$ (3)	K_{b_g} (GPa)
10	4.04	24.75	1.07	93.46	2.97	33.67
25	4.09	24.49	1.11	90.09	2.98	33.56
40	4.13	24.21	1.14	87.72	2.99	33.44
55	4.23	23.64	1.23	81.30	3.00	33.33

Tableau 5.9 : Coefficients et modules de compressibilité du mercure en fonction de la température d'après M.DIAZ PERA (1959).

(1) : K_{Hg} = coefficient de compressibilité absolu du mercure obtenu en ajoutant la 4ème et la 5ème colonne.

(2) : $K_{Hg} - K_g$ = coefficient de compressibilité apparent du mercure déterminé par M.DIAZ PERA (1959).

(3) : K_g = coefficient de compressibilité du verre déterminée par P.W.BRIGHAM (1925).

L'approche expérimentale de la compressibilité du mercure nous a permis d'expliquer les différences qui existent entre les coefficients de compressibilité mesuré et absolu du mercure. Il est donc possible de corriger les spectres porosimétriques à partir des coefficients de compressibilité figurant dans les tables à la condition de tenir compte des variations de volume du dilatomètre. Les corrections à effectuer sur les spectres porosimétriques s'expriment par la relation :

(5.16)

$$|dV_{\text{corrigé}}(P)| = |dV_{\text{mesuré}}(P)| - \left[K_{\text{granite}}(P) \cdot V_{\text{granite}} - K_{Hg}(P) \cdot V_{Hg} + K_v(P) \cdot V_D \right] \cdot P$$

Si l'on néglige la compression du granite en effectuant seulement la correction relative au mercure sur les spectres porosimétriques, la relation (5.16) se réduit à l'expression :

$$|dV(P)| = |dV_{\text{mesuré}}(P)| - \left[K_{Bg}(P) * V_{Bg} + K_v(P) * V_D \right] * P \quad (5.17)$$

Nous avons représenté sur les fig.5.13.a et 5.13.b les courbes d'injection relatives à l'échantillon 966.40 corrigées à l'aide de (5.17). On constate que les volumes de mercure corrigés sont supérieurs aux volumes bruts. Cela signifie que dans les conditions de l'essai, la diminution de volume du dilatomètre est supérieure à celle du mercure. En effet, bien que le verre soit moins compressible que le mercure, le volume du dilatomètre est suffisamment grand par rapport à celui du mercure pour que sa diminution de volume soit supérieure à celle du dilatomètre.

5.3.2. - Mise au point d'un nouvel essai de mesure de la diminution de volume du granite en fonction de la pression :

5.3.2.1. - Introduction :

Il s'agit de recréer sur l'échantillon étudié le même état de contraintes et les mêmes conditions physiques qu'il aura à subir lors de l'essai porosimétrique.

Ces conditions sont les suivantes :

- garantir une pression hydrostatique de 0.1 MPa à 150 MPa.
- l'essai doit-être non destructif pour permettre une réutilisation de l'échantillon dans le cadre d'un essai porosimétrique.

Ces conditions sont réunies si l'on utilise le porosimètre CARLO-ERBA, en ajoutant quelques modifications dans le protocole de l'essai classique de porosimétrie au mercure.

5.3.2.2. - Mise en oeuvre de l'essai :

5.3.2.2.1. - Dispositif expérimental :

a) Choix de l'appareillage de mesure :

Le dispositif expérimental est représenté en détail sur la fig.5.14. Le matériel de mesure est constitué du porosimètre CARLO-ERBA 1500. En effet, il n'a pas été possible de mobiliser le porosimètre CARLO-ERBA 2000 WS pendant une longue durée et surtout de modifier l'appareillage sans nuire à l'activité des autres utilisateurs. Nous avons donc employé un porosimètre CARLO-ERBA 1500 qui est d'une génération antérieure (1974).

b) Description du principe de fonctionnement du porosimètre CARLO-ERBA 1500 (1974) dans le cadre d'un essai porosimétrique de routine :

La gamme de pression du porosimètre CARLO-ERBA 1500 s'étend de 0 à 150 MPa.

Le principe de fonctionnement de cet appareil reste le même que celui décrit au paragraphe 5.1.2. Le système de contrôle de la baisse du niveau de mercure dans le capillaire est électromécanique. Une aiguille d'acier inoxydable asservie à un moteur est placée au début de l'essai au contact avec la surface libre du mercure. Dans cette configuration (cf.fig.5.15.a), le courant électrique peut circuler jusqu'à l'électrode se trouvant au fond du dilatomètre et qui est relié à un relais. Lors de la mise en pression, le niveau de l'interface du mercure baisse et le contact électrique est rompu entre l'aiguille et l'électrode.

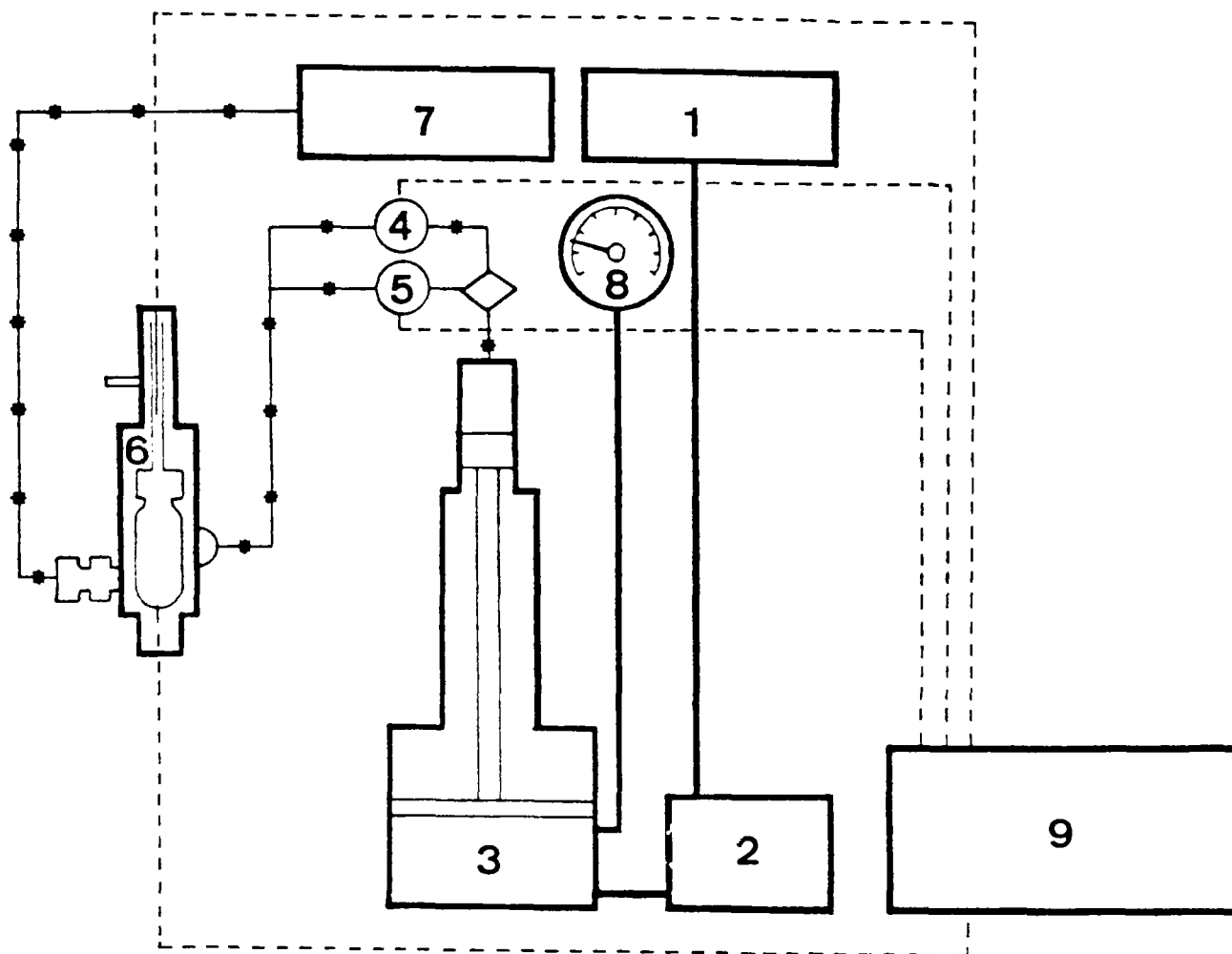


FIG.5.14: Schéma de principe du porosimètre CARLO.ERBA 1500 (1974)

1. réservoir d'huile
2. pompe
3. multiplicateur de pression
4. capteur de pression de 0 à 10 MPa
5. capteur de pression de 10 à 200 MPa
6. autoclave
7. réservoir d'alcool absolu
8. réglage de la pression maximale
9. tableau de contrôle

— circuit d'huile
 ••• circuit d'alcool absolu
 ---- circuit électrique

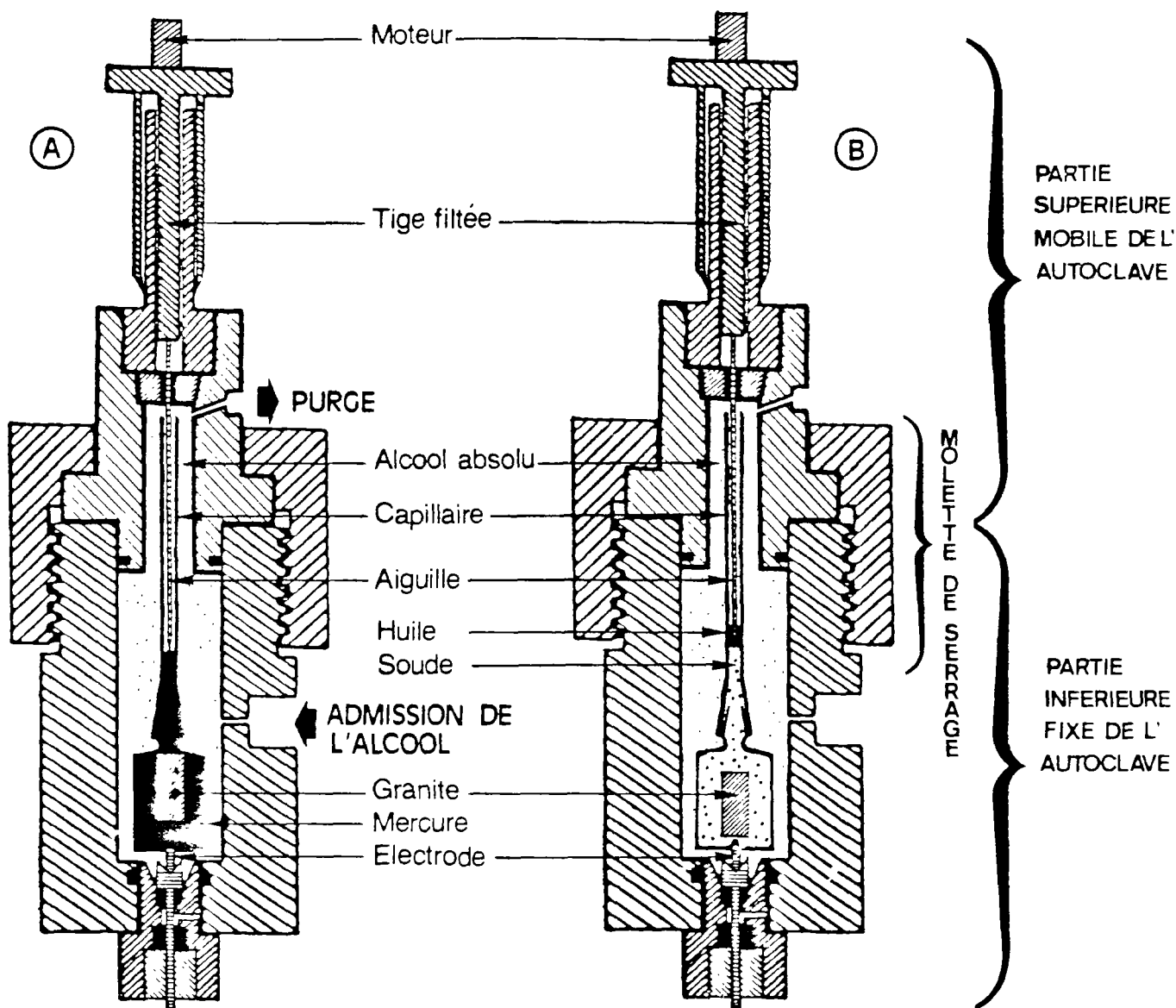


FIG.5.15 : Configurations du dilatomètre placé dans l'autoclave du porosimètre CARLO-ERBA 1500 (1974) :

- Ⓐ : pour un essai classique de porosimétrie au mercure
- Ⓑ : pour la mesure de la compressibilité du granite

Le relais déclenche le moteur qui entraînera l'aiguille au contact du mercure et désactive momentanément le système de mise sous pression. Dès que le moteur se met en marche, un enregistreur saisit simultanément les valeurs de la pression courante régnant dans l'autoclave et de la hauteur d'enfoncement de l'aiguille dans le capillaire. Une fois le contact rétabli, le relais désamorce le moteur et réactive la mise sous pression.

5.3.2.2.2. - Description de l'essai - Acquisition des données :

5.3.2.2.2.1. - Modifications apportées au porosimètre CARLO-ERBA 1500 dans le but de mesurer des compressibilités - Principe de l'essai :

L'échantillon saturé est placé dans le dilatomètre D contenant une solution conductrice (solution de soude). Une phase d'huile isolante sépare la solution conductrice de la phase d'alcool qui occupe la totalité de l'espace libre de l'autoclave. Au début de l'essai, une aiguille asservie à un moteur est placée au niveau de l'interface solution conductrice-huile de manière à établir un contact électrique entre le moteur et l'anode du dilatomètre.

Lors de la montée en pression, le dilatomètre et son contenu se compriment ce qui entraîne la baisse de niveau de l'interface solution conductrice-huile dans le capillaire. L'aiguille restant fixe, le contact électrique se rompt et amorce le moteur afin de rétablir le contact entre l'aiguille et la solution conductrice. Pour une pression donnée, on enregistre la baisse de niveau de l'interface solution conductrice-huile que l'on convertit en diminution de volume dV . La diminution de volume est relative à l'ensemble dilatomètre, solution conductrice et échantillon (cf.fig.5.15.b).

5.3.3.2.2.2. - Variantes de l'essai :

La compressibilité de la phase liquide étant très forte par rapport à celle de la phase solide, nous avons été amené à diminuer sa proportion en la substituant en partie par un mélange le plus compact possible de microbilles de verre et en doublant le volume de granite testé. D.GUILLOT (1982) a étudié en détail les propriétés pétrophysiques de ce matériau pulvérulent artificiel. Il s'agit de microsphères industrielles dont l'assemblage constitue un sable artificiel ayant une porosité minimale de 35 % environ.

Cette substitution permet l'utilisation d'un second dilatomètre doté d'un capillaire plus fin : $\phi = 3.430$ mm qui assure par conséquence une plus grande précision des mesures. Cependant la diminution de son diamètre entraîne un rétrécissement du champ de pression accessible (mesures possibles de 0 à 50 MPa seulement) ainsi qu'une baisse de conductance. Nous avons donc été amenés à porter la concentration de la solution de soude de 10^{-1} N à 10^{-1} N.

Fournisseur des microbilles :

Poudres et grenailles métalliques, 45, rue J.P.Timbaud 93240 STAIN

Caractéristiques granulométriques du mélange de microbilles :

29.7000 g de microbilles	100 μ m	> ϕ	> 63 μ m
57.3000 g de microbilles	250 μ m	> ϕ	> 200 μ m

porosité
 $\approx 35 \%$

Composition chimique des billes de verre (données fournisseur):

SiO ₂	=	72.00 à 73.00 %
Na ₂ O	=	13.00 à 14.00 %
K ₂ O	=	0.20 à 0.60 %
MgO	=	3.50 à 4.00 %
Fe ₂ O ₃	=	0.08 à 0.11 %
Al ₂ O ₃	=	0.80 à 2.00 %
SO ₂	=	0.20 à 0.30 %

Densité des billes de verre : $d = 2.48 \text{ g/cm}^3$ (d'après nos mesures et celles du fournisseur).

Compressibilité du verre : $K_b = 33.3 \text{ GPa}$ à 20°C (d'après H.SCHOLZE, 1974)

Configuration et caractéristiques des dilatomètres :

La détermination du coefficient de compressibilité du granite en fonction de la pression a nécessité l'emploi de trois dilatomètres configurés de cinq manières différentes (cf. tableau 5.10).

Leurs caractéristiques intrinsèques sont rassemblées dans le tableau 5.11.

Le volume de granite sera noté VG_1 dans la configuration N°2a. et $VG_1 + VG_2$ dans la configuration 3 (avec $VG_1 \approx VG_2$).

N°1 dilatomètre 1 + solution conductrice.
N°2a dilatomètre 1 + solution conductrice + granite.
N°2b dilatomètre 2 + solution conductrice + billes de verre.
N°3 dilatomètre 2 + solution conductrice + billes de verre + granite.
N°4 dilatomètre 3 + mercure

Tableau 5.10 : Références et configurations des dilatomètres qui ont été utilisés pour déterminer le coefficient de compressibilité du granite en fonction de la pression.

Référence	Diamètre du capillaire (mm) à 35°C	Volume total (mm ³) à 35°C
1	$\phi = 5.509$	$VD_1 = 84817$
2	$\phi = 3.430$	$VD_2 = 83427$
3	$\phi = 3.484$	$VD_{Hg} = 85525$

Tableau 5.11 : Caractéristiques des dilatomètres utilisés pour la mesure de la compressibilité de la matrice granitique.

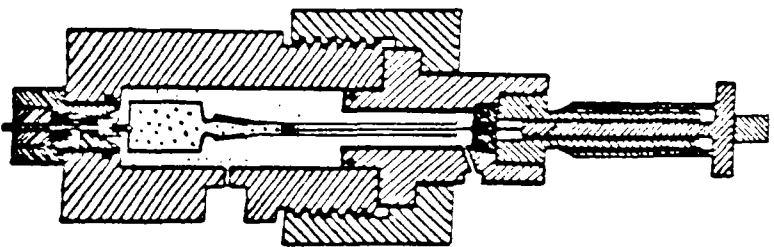
La fig.5.16 schématise les différentes configurations des trois dilatomètres.

Le traitement numérique des données consiste à décomposer la part de diminution de volume due à chacun des éléments constitutifs du dilatomètre dans la configuration où l'éprouvette de granite est présente.

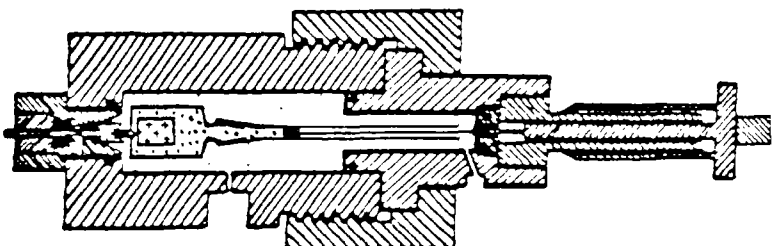
5.3.2.3. - Traitement des données expérimentales :

5.3.2.3.1. - Mise en forme des données expérimentales :

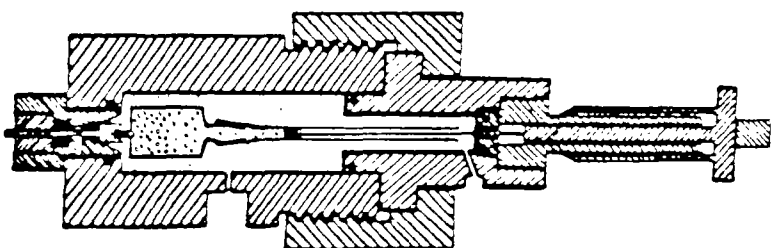
A la fin de chaque essai, on obtient pour chaque pression une hauteur d'enfoncement de l'aiguille dans un capillaire de diamètre ϕ connu. Le premier traitement consiste à convertir les hauteurs d'enfoncement en volumes.



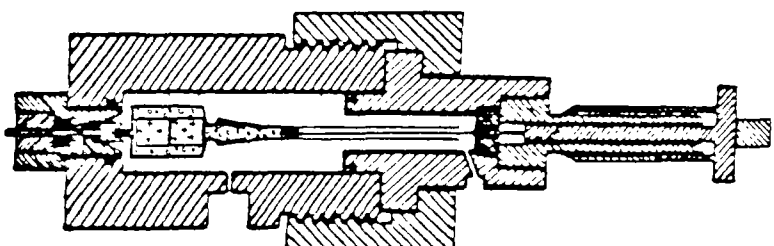
CONFIGURATION N°1
Dilato.1
+ Soude



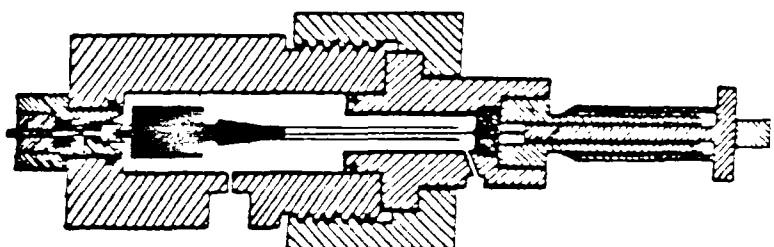
CONFIGURATION N°2a
Dilato.1
+ Soude
+ Granite





CONFIGURATION N°2b
Dilato.2
+ Soude
+ Billes de verre




CONFIGURATION N°3
Dilato.2
+ Soude
+ Billes de verre
+ Granite



CONFIGURATION N°4
Dilato.3
+ Mercure

 SOUDE
 ALCOOL

 MERCURE

 HUILE

 BILLES DE VERRE

 GRANITE

FIG.5.16: CONFIGURATIONS DES DILATOMETRES UTILISES POUR DETERMINER
LE COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITE DU GRANITE

$$dV = h \cdot (d/2)^2 \cdot \pi \quad (5.18)$$

h : hauteur d'enfoncement de l'aiguille
d : diamètre du capillaire

Les données expérimentales ne permettent pas, compte tenu de la méthode d'acquisition employée, d'être comparées directement d'une expérience à l'autre. En effet, la saisie de la hauteur d'enfoncement n'est pas faite à intervalle constant de pression, mais à chaque fois que le niveau de l'interface fluide conducteur-huile baisse d'au moins 0.2 mm. Pour pouvoir comparer deux courbes et y effectuer des calculs, on procède tous les 0.5 MPa à un échantillonnage par interpolation linéaire.

5.3.2.3.2. - Détermination de la part de diminution de volume due à la compression de la matrice granitique :

5.3.2.3.2.1. - Formalisme - Equations d'état :

a) Cas où la totalité du fluide conducteur est conservée :

Equations d'états :

* *Configuration N°1 du dilatomètre : dilatomètre 1 + soude.*

On obtient $dV1_{soi}$ en fonction de la pression P, pour les volumes initiaux $V1_{soi}$ et $VD1$:

$$|dV1(P)| = \left[K_{NaOH}(P) \cdot V1_{NaOH} - K_v(P) \cdot VD1 \right] \cdot P \quad (5.19)$$

* *Configuration N°2a du dilatomètre : dilatomètre 1 + soude + granite.*

On obtient $dV2a$ en fonction de la pression P, pour les volumes initiaux $V2a_{soi}$, $VG1$ et $VD1$:

$$|dV2a(P)| = \left[K_{NaOH}(P) \cdot V2a_{NaOH} + K_{granite}(P) \cdot VG1 - K_v(P) \cdot VD1 \right] \cdot P \quad (5.20)$$

b) Cas où une partie du fluide conducteur est substitué par des billes de verre :

Equations d'états :

* *Configuration N°2b du dilatomètre : dilatomètre 2 + soude + billes de verre.*

On obtient $dV2b$ en fonction de la pression P, pour les volumes initiaux $V2b_{soi}$, $Vbilles$ et $VD2$:

$$|dV2b(P)| = \left[K_{NaOH}(P) \cdot V2b_{NaOH} + K_v(P) \cdot Vbilles - K_v(P) \cdot VD2 \right] \cdot P \quad (5.21)$$

* *Configuration N°3 du dilatomètre : dilatomètre 2 + soude + billes de verre + granite.*

On obtient $dV3$ en fonction de la pression P, pour les volumes initiaux $V3_{soi}$, $Vbilles$, $VG1 + VG2$ et $VD2$:

$$|dV3(P)| = \left[K_{NaOH}(P) \cdot V3_{NaOH} + K_v(P) \cdot Vbilles + K_{granite}(P) \cdot (VG1 + VG2) - K_v(P) \cdot VD2 \right] \cdot P \quad (5.22)$$

Les expressions (5.19) à (5.22) constituent un système de quatre équations à trois inconnues (en considérant que les coefficients de compressibilité du pyrex (dilatometre) et des billes (verre) sont identiques).

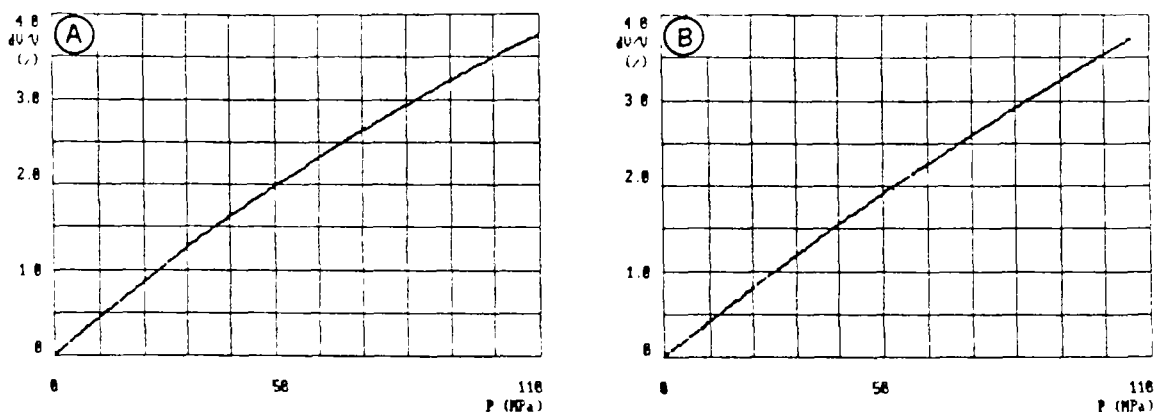


FIG.5.17.:dV/V(P) DE L'EAU A 25°C D'APRES R.E. GIBSON & O.H. LOFFLER - (A)
 .dV/V(P) DE LA SOUDE 10⁻²N A 35°C A PARTIR DE NOS MESURES - (B)

Les inconnues sont les coefficients de compressibilité suivants : $K_{\text{relat}}(P)$, $K_{\text{abs}}(P)$ et $K_1(P)$. Le déterminant caractérisant ce système d'équations étant nul, nous avons levé l'indétermination mathématique en réduisant le nombre d'inconnues à 2 en introduisant un coefficient de compressibilité tiré de la littérature.

5.3.2.3.2.2. - Détermination des $K_{\text{relat}}(P)$ à partir des $K_{\text{abs}}(P)$ tirés de la littérature :

Les valeurs des modules de compressibilité de la soude obtenues expérimentalement avec le porosimètre et celles de l'eau tirées de la littérature sont relativement proches.

Les tables de la littérature (Handbook of Chemistry and Physics, 1969) donnent les coefficients de compressibilité de l'eau à 25°C pour 1 et 1000 atm en spécifiant que le module de compressibilité varie linéairement avec la pression (cf.tableau 5.12).

$P = 1.015 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$	$K = 0.457 \text{ /GPa}$	$K_b = 2.19 \text{ GPa}$	pour l'eau à 25 °C
$P = 1015 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$	$K = 0.348 \text{ /GPa}$	$K_b = 2.87 \text{ GPa}$	

Tableau 5.12 : modules et coefficients de l'eau d'après R.E.GIBSON
 et O.H.LOFFLER (1941).

On en déduit, par exemple, que $K_{b,rel} = 2.59 \text{ GPa}$ pour $P = 60 \text{ MPa}$.

Expérimentalement, pour la même pression, $K_{b,rel} = 2.65 \text{ GPa}$. A 60 MPa, il existe une différence de 2.3 % entre les données expérimentales et celles tirées de la littérature.

Les fig.5.17.a et 5.17.b représentent les courbes dV(P) de l'eau et de la solution de soude, respectivement d'après les données de R.E.GIBSON & O.H.LOFFLER (1941) et à partir de nos mesures.

Il est intéressant de constater que pour le même essai réalisé avec le mercure (cf.paragraphe 5.3.1), la différence entre les modules de compressibilité mesuré (25.27 GPa) et absolu (93.08 GPa) est de 72.9 % à 50 MPa. Cet écart très important est dû au fait que le mercure et le verre ont des modules de compressibilité très proches ($K_{b,verr}(50\text{MPa}) = 34.68 \text{ GPa}$).

Si l'on compare les modules de compressibilité de l'eau et du verre, on obtient la relation suivante :

$$K_{b, verre}(P) \approx 10 \cdot K_{e, eau}(P) \quad (5.23)$$

Cela explique les faibles différences entre les valeurs des dV/V mesurées et tirées des tables dans le cas de notre solution de soude.

Des équations (5.19) et (5.20), on obtient par différence l'expression de $K_{granite}(P)$:

(5.24)

$$K_{granite}(P) = \frac{1}{VG1 \cdot P} \cdot \left[|dV2a(P)| - |dV1(P)| - K_{NaOH}(P) \cdot (V2a_{NaOH} - V1_{NaOH}) \cdot P \right]$$

Il est aussi possible de tirer $K_{granite}(P)$ à partir des équations (5.21) et (5.22) :

(5.25)

$$K_{granite}(P) = \frac{1}{(VG1+VG2) \cdot P} \cdot \left[|dV3(P)| - |dV2b(P)| - K_{NaOH}(P) \cdot (V3_{NaOH} - V2a_{NaOH}) \cdot P \right]$$

Dans les expressions (5.24) et (5.25), on considère que les comportements de la solution de soude et de l'eau sont sensiblement les mêmes vis à vis de la pression.

Les valeurs des $K_{granite}(P)$ obtenues à partir de l'expression (5.25) devraient être plus précises que celles calculées avec (5.24). En effet, la précision de mesure des termes $dV3b(P)$ et $dV2b(P)$ est supérieure à celle de $dV1(P)$ et $dV2a(P)$. L'emploi d'un capillaire plus fin et la substitution d'une partie de la soude par des billes de verre a permis d'augmenter la précision des mesures.

Cependant, il s'avère que les valeurs des $K_{granite}(P)$ calculées à partir des expressions (5.24) et (5.25), sont systématiquement négatives (en moyenne le granite semble se dilater de 0.01 %) ce qui est physiquement absurde.

5.3.2.3.2.3. - Détermination des $K_{granite}(P)$ à partir des $K_i(P)$ tirés de la littérature :

Une des causes probables de l'échec de la détermination des $K_{granite}(P)$ à partir des $K_{i, eau}(P)$ tirés des tables de la littérature réside dans le fait que l'essai est réalisé avec une solution de NaOH 10^{-1} N dont la température est maintenue à 35°C, et non avec de l'eau pure à 25°C. P.G.TAIT (1889), lors d'une expédition du navire océanographique *Challenger* mesurait déjà une différence sensible entre les coefficients de compressibilité de l'eau naturelle et l'eau de mer. En ce qui concerne notre étude, l'approximation consistant à utiliser le coefficient de compressibilité de l'eau pure à la place de celui de la solution de soude apparaît donc être une source d'erreur fatale. Nous avons donc cherché à calculer le coefficient de compressibilité absolu de la solution de soude en fonction de la pression. Pour ce faire, il a été nécessaire de déterminer le coefficient de compressibilité du verre $K_v(P)$.

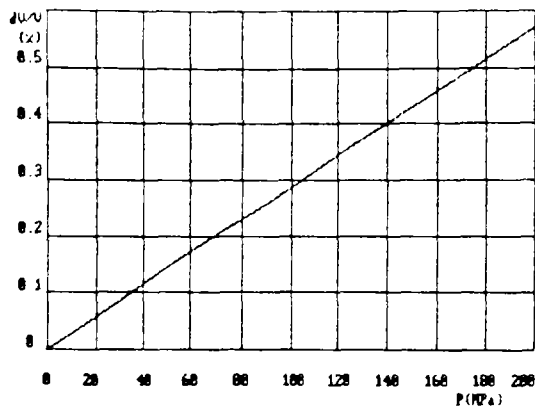


FIG 5.18 $dV/V/P$ DU DILATOMETRE EN PYREX

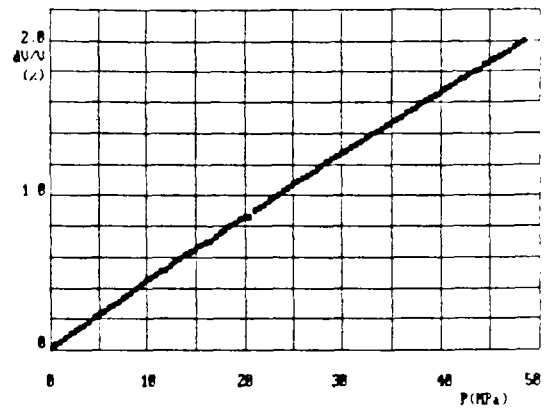


FIG 5.19 $dV/V/P$ ABSOLU DE $\text{NaOH } 10^{-2}\text{N}$

$K_V(P)$ peut être déterminé de deux manières :

a) à partir de l'équation (5.19) :

$$K_V(P) = K_{\text{eau absolu}}(P) - K_{\text{NaOH mesuré}}(P) \quad (5.26)$$

d'où

$$K_V(P) = \frac{1}{V_{D1} \cdot P} * \left[|dV_1(P)| - K_{\text{NaOH}}(P) * V_{\text{NaOH}} * P \right] \quad (5.27)$$

Cette solution est à rejeter car pour accéder à $K_V(P)$, nous sommes obligés d'introduire $K_{\text{NaOH}}(P)$ dans les calculs.

b) à partir de l'expression (5.15) :

$$K_V(P) = K_{\text{Hg absolu}}(P) - K_{\text{Hg mesuré}}(P) \quad (5.28)$$

d'où

$$K_V(P) = \frac{1}{V_{D\text{Hg}} \cdot P} * \left[|dV(P)| - K_{\text{Hg}}(P) * V_{\text{Hg}} * P \right] \quad (5.29)$$

La fig.5.18 représente les variations de volume du dilatomètre en fonction de la pression. On constate que le volume du dilatomètre diminue d'environ 0.55 % à 200 MPa alors que pour la même pression le mercure s'est comprimé d'environ 0.75 %.

Connaissant $K_V(P)$, il est possible de déduire $K_{\text{NaOH}}(P)$ à partir des résultats obtenus avec le dilatomètre 1 dans la configuration N°1 (cf.fig.5.19).

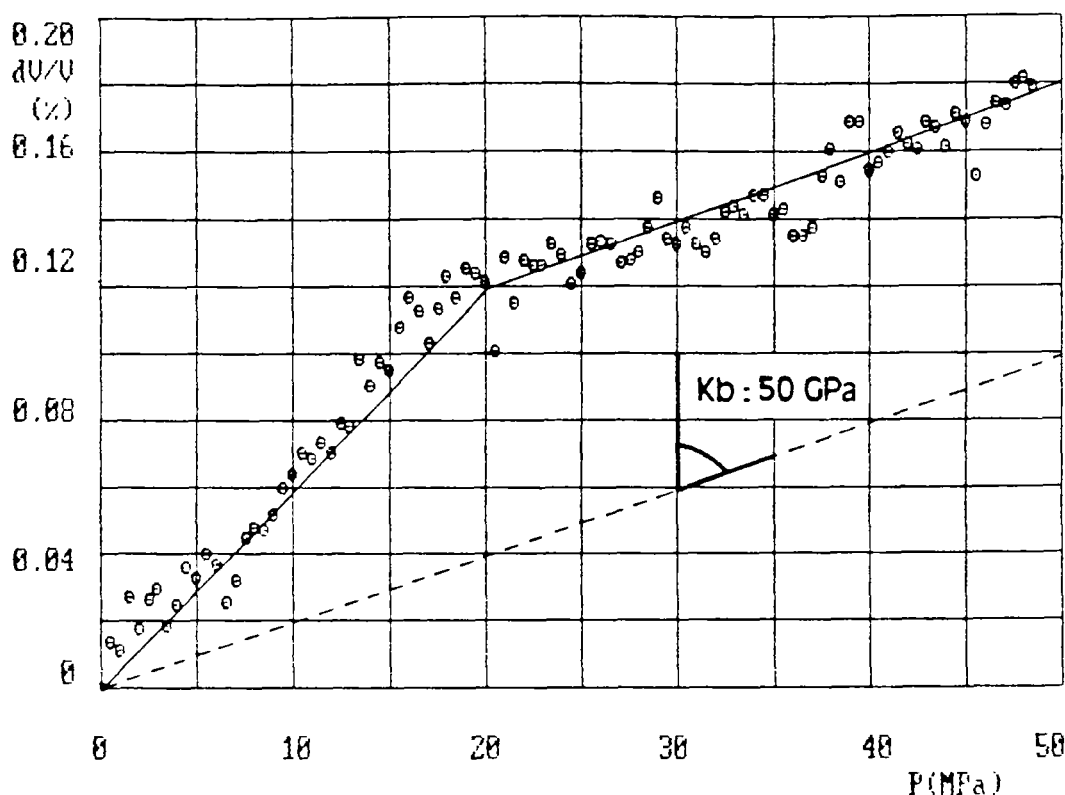


FIG.5.20: DETERMINATION DU MODULE DE COMPRESSIBILITE Kb
DU GRANITE D'AURIAT
Ech 402.80: faciès rubéfié

$$K_{NaOB}(P) = - \frac{1}{V_{NaOB}} * \frac{dV_{NaOB}(P)}{dP} + K_v(P) \quad (5.30)$$

Il suffit d'introduire dans l'expression (5.25) les valeurs de $K_{NaOB}(P)$ calculées en (5.30) pour accéder à $K_{granite}(P)$. Les résultats sont satisfaisants mais nécessitent d'être analysés car ils ne sont pas directement utilisables.

5.3.2.4. - Interprétation des résultats :

En ce qui concerne la matrice granitique, la représentation de dV/V en fonction de P (cf.fig.5.20) montre, en première analyse, que l'échantillon se comprime fortement de 0 à 20 MPa jusqu'à 0.12 % environ. A partir de 20 MPa, la diminution de volume de l'échantillon semble plus progressive et se poursuit linéairement en fonction de la pression.

La diminution de volume qui se produit entre 0 et 20 MPa peut s'interpréter de plusieurs manières. Dans le cadre d'un essai triaxial, cette portion de la courbe témoignerait du serrage de la fissuration. Il n'en est pas de même pour notre essai. En effet, si l'on considère que l'échantillon est totalement saturé et que le champ de contrainte est effectivement de nature purement hydrostatique, le serrage des fissures n'est pas envisageable. Par contre, si l'on fait l'hypothèse que les contraintes ne se transmettent pas instantanément entre le milieu extérieur et le coeur de l'échantillon, on peut alors envisager la possibilité d'un serrage des fissures. Ce phénomène se traduira physiquement par l'expulsion de l'eau fissurale hors de l'espace poreux. Cependant la totalité du volume de soude sera conservé et le serrage des fissures passera inaperçu.

On écartera également l'interprétation qui consisterait à dire que la diminution de volume qui se produit entre 0 et 20 MPa serait due à la seule compressibilité de la matrice granitique.

Nous sommes arrivés à la conclusion que la diminution de volume observée entre 0 et 20 MPa serait due à l'injection de la solution de soude soit dans une fraction de l'espace poreux du granite qui serait restée libre, soit dans l'espace poreux imparfaitement saturé des billes de verre. Une superposition des deux phénomènes est envisageable.

Précédemment, nous avons mesuré la porosité de cet échantillon (échantillon 402.80) et l'avons estimé à 0.88 % (cf.paragraphe 3.2.4.3).

Si l'on considère que le déficit de saturation est supporté entièrement par le granite, l'imbibition réalisée sous vide dans les conditions standard (NF P 18-554 Décembre 1979) permettrait de saturer seulement 88 % environ d'un échantillon de granite de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur = 40 mm. Compte tenu des précautions opératoires (cf. mode opératoire de mesure de la compressibilité du granite ; annexe 5), une telle erreur sur la saturation de l'échantillon est difficilement concevable. Pour des raisons de temps, les conditions d'imbibition de l'assemblage de billes ne sont pas aussi drastiques que pour le granite (le temps d'exécution de la manipulation passerait d'une dizaine à une vingtaine de jours). Il est donc probable qu'une part non négligeable du déficit de saturation soit à imputer aux billes de verre.

A partir de 20 MPa, la diminution de volume se poursuit linéairement en fonction de la pression mais plus lentement qu'aux faibles pressions. Les vides étant entièrement occupés par la solution de soude, la pression hydrostatique s'exerce sur les grains constitutifs du granite. La pente de cette partie linéaire de la courbe est le module de compressibilité du granite $K_{B, granite}$ qui a pour valeur 50 GPa.

La valeur de $K_{B, granite}$ est la même que celle déterminée par le L.M.S à partir d'essais classiques (essai triaxial par exemple).

La convergence des valeurs des modules de compressibilité obtenus à partir de méthodes expérimentales de conception totalement différentes, vérifie ce point de la théorie de l'élasticité, si cela était encore nécessaire.

Dans le cadre de la correction des courbes porosimétriques (cf.relation (5.16)), il est indispensable d'effectuer la correction de compressibilité du granite en considérant seulement la dernière partie linéaire de la courbe $dV/V(P)$ (à partir de $P = 20$ MPa). Pour un même échantillon, si l'on utilise la totalité de la courbe pour effectuer les corrections, les volumes de mercure injectés mesurés deviennent systématiquement négatifs ce qui est irréaliste.

5.3.3. - Conclusion :

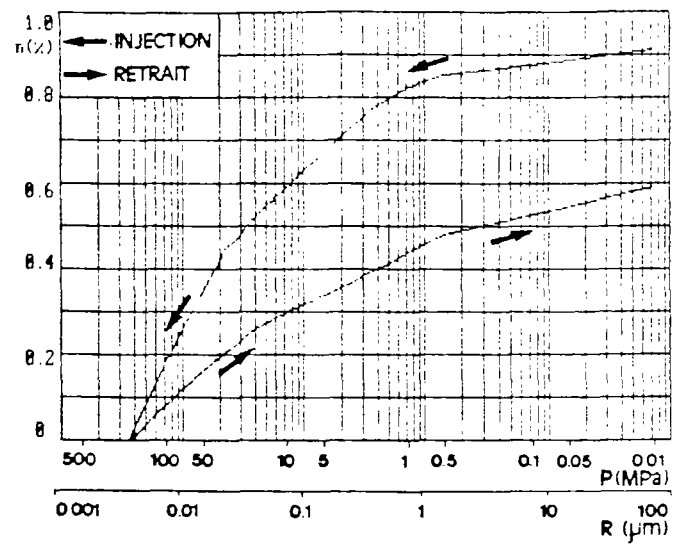
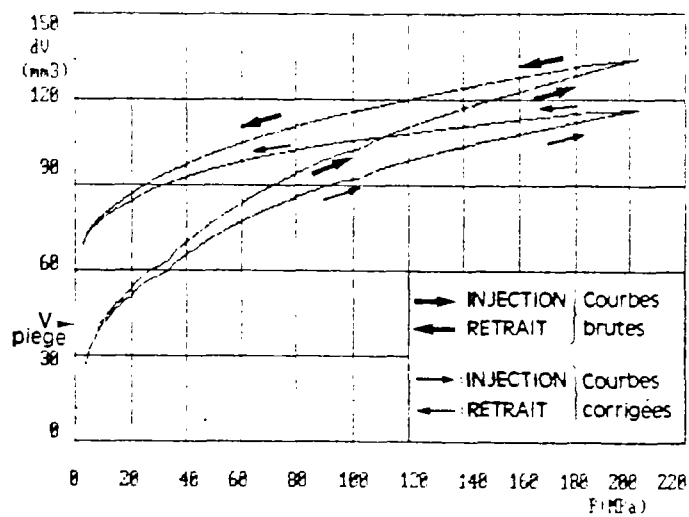
La correction des courbes porosimétriques se fait en appliquant la relation suivante :

(5.16)

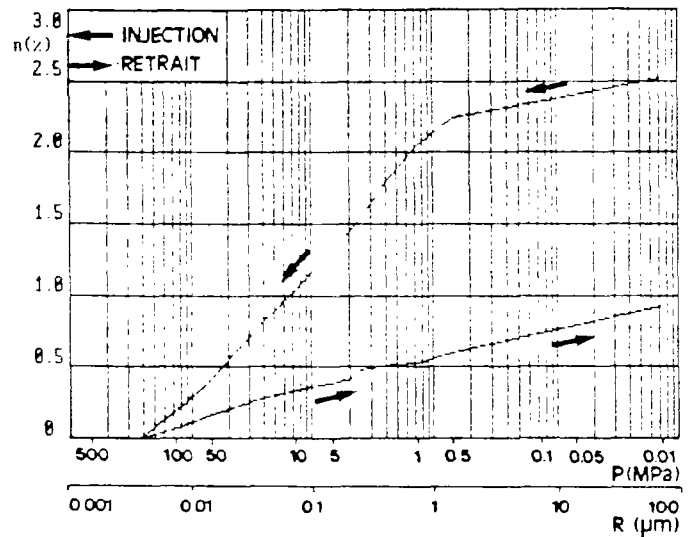
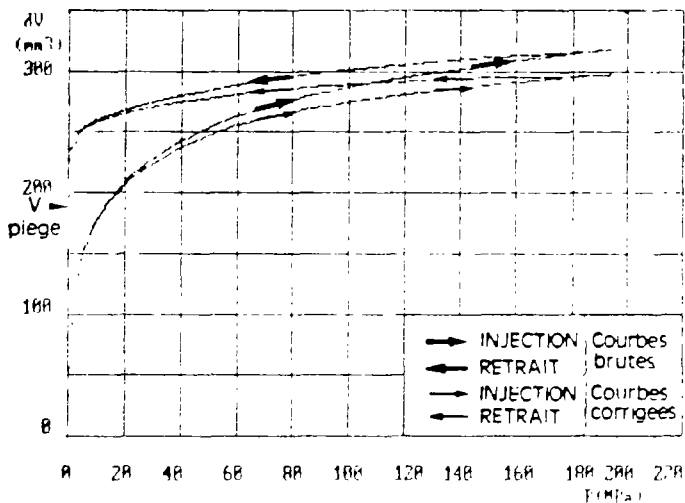
$$|dV_{\text{corrigé}}(P)| = |dV_{\text{mesuré}}(P)| - \left[K_{\text{granite}}(P) * V_{\text{granite}} - K_{Bg}(P) * V_{Bg} + K_v(P) * V_D \right] * P$$

Variables :

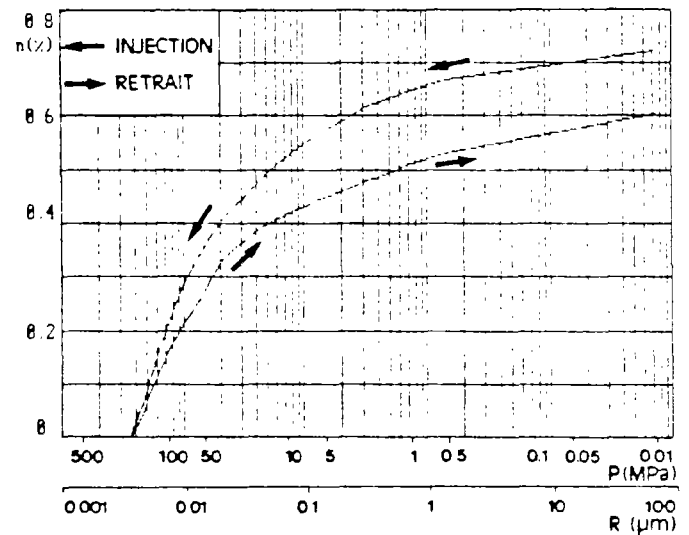
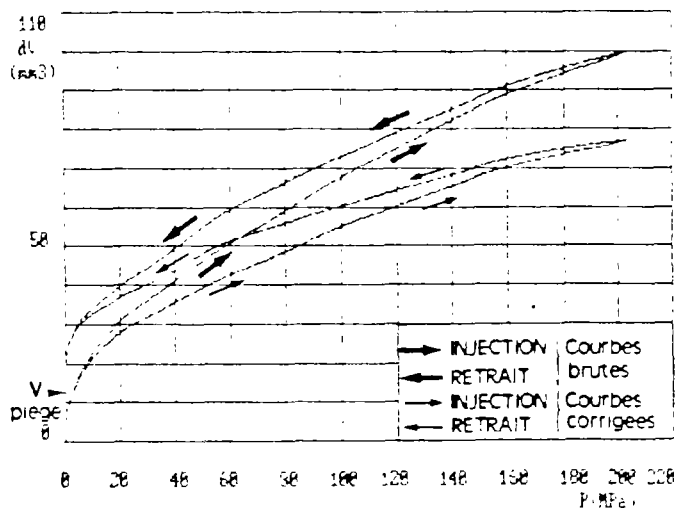
$dV(P)$: volume de mercure injecté/expulsé corrigé
 $dV_{\text{mesuré}}(P)$: volume de mercure injecté/expulsé mesuré
 $K_{\text{granite}}(P)$: coefficient de compressibilité du granite
 $K_{Bg}(P)$: coefficient de compressibilité du mercure
 $K_v(P)$: coefficient de compressibilité du verre



Echantillon 34.20 : granite rubéfié (G1)+ alt. météorique - $n = 0.75 \%$

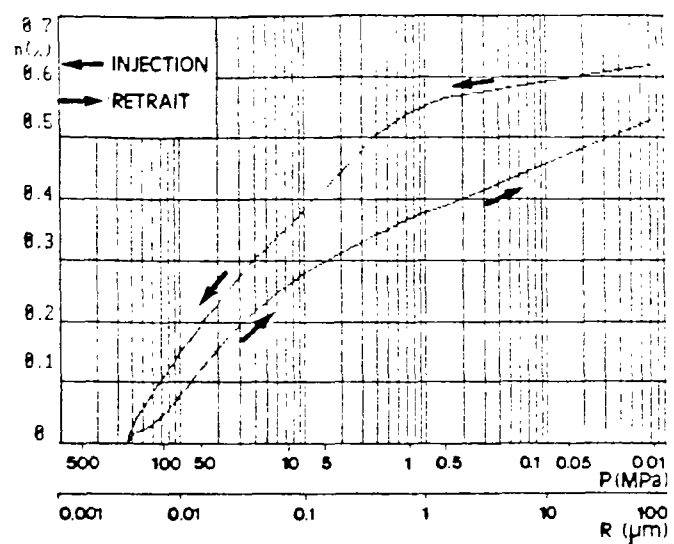
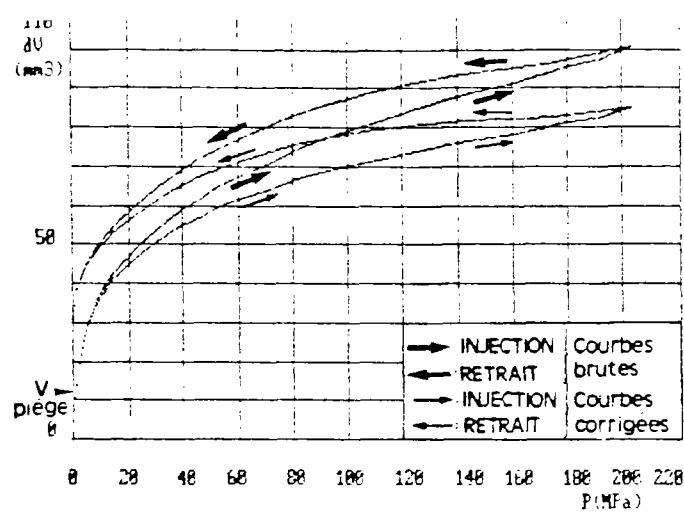


Echantillon 153.35 : granite rubéfié (G1) - $n = 2.22 \%$

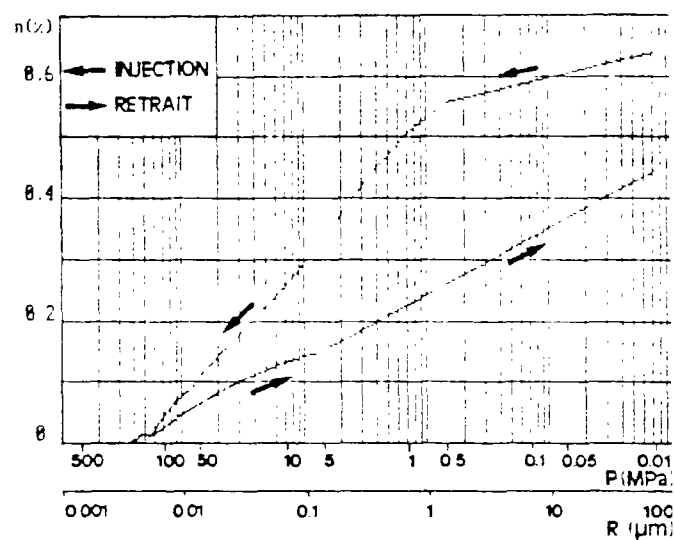
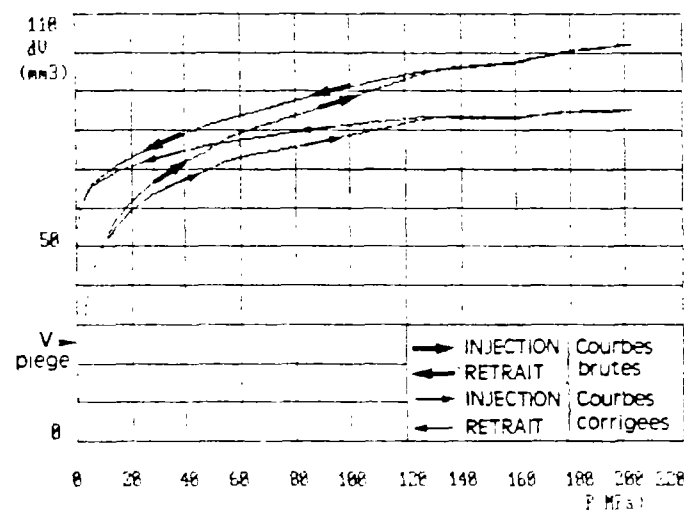


Echantillon 220.80 : granite rubéfié (G1) - $n = 0.56 \%$

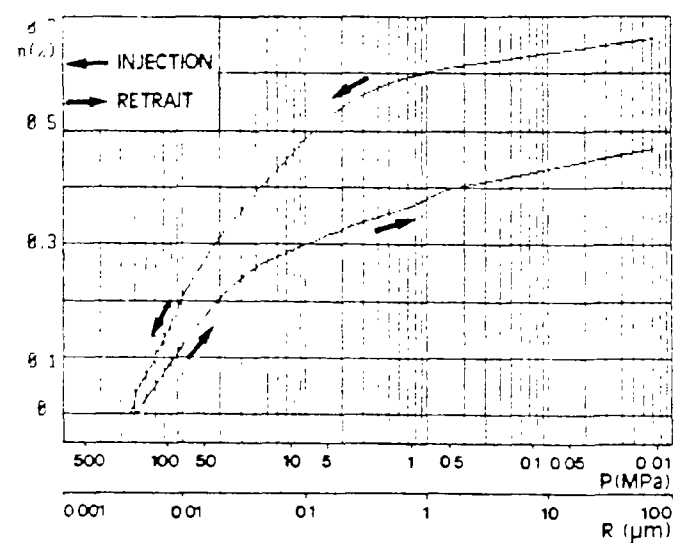
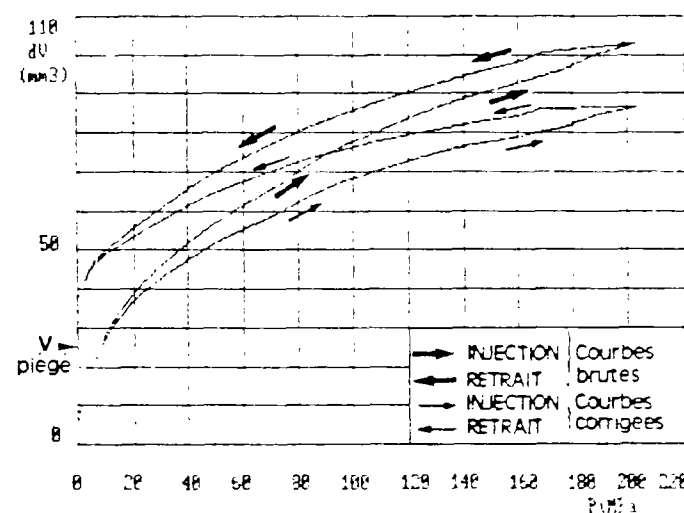
FIG.5.21.a : * spectres porosimétriques corrigés (à droite)
* courbes d'injection et de retrait brutes et corrigées (à gauche)



Echantillon 237.30 : granite gris à l'aspect sain (G1) - $n = 0.45 \%$



Echantillon 966.40 : granite gris à l'aspect sain (G2) - $n = 0.70 \%$



Echantillon 981.60 : granite rubéfié (G2) - $n = 0.67 \%$

FIG.5.21.b : * spectres porosimétriques corrigés (à droite)
* courbes d'injection et de retrait brutes et corrigées (à gauche)

Constantes :

V_{granite} : volume de granite présent dans le dilatomètre
 V_D : volume total du dilatomètre
 V_{Hg} : volume total de mercure présent dans le dilatomètre

En ce qui concerne le choix des coefficients de compressibilité du mercure, du granite et du verre, nous avons montré que les résultats issus de nos expériences convergeaient aussi bien avec ceux des mécaniciens des roches pour ce qui concerne le granite qu'avec ceux des physiciens spécialistes de la mesure des constantes physiques pour le mercure.

La méthode de détermination du coefficient de compressibilité du granite que nous avons mis au point donne des résultats satisfaisants mais sa mise en oeuvre reste longue et délicate. Cette méthode ne prétend pas concurrencer les essais mécaniques classiques de mesure de la compressibilité mais pourra être éventuellement utilisée dans le cadre de l'étude de matériaux "à problèmes". Le mode opératoire de cet essai est détaillé dans l'annexe 4.

La correction des courbes porosimétriques (courbes d'injection et de retrait) peut donc être faite à partir des tables de la littérature à condition de tenir compte de la déformation du dilatomètre et de connaître les volumes de granite et de mercure entrant en jeu dans l'essai.

Cette méthode de correction est applicable à tous les matériaux (quelle que soit leur porosité) supportant l'essai porosimétrique. Sa mise en oeuvre ne nécessite aucun étalonnage particulier.

Les spectres porosimétriques corrigés sont rassemblés sur les fig.5.21.a et 5.21.b. Nous y avons représenté les courbes de l'" injection et de l'" retrait.

5.4. - Exploitation des résultats :

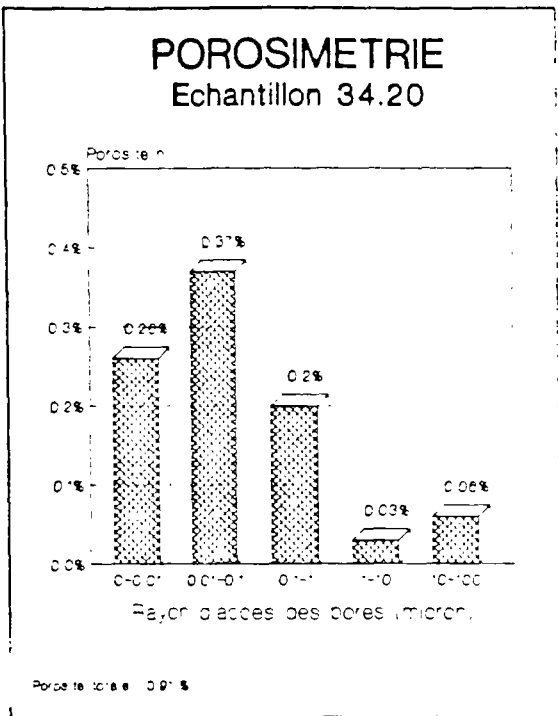
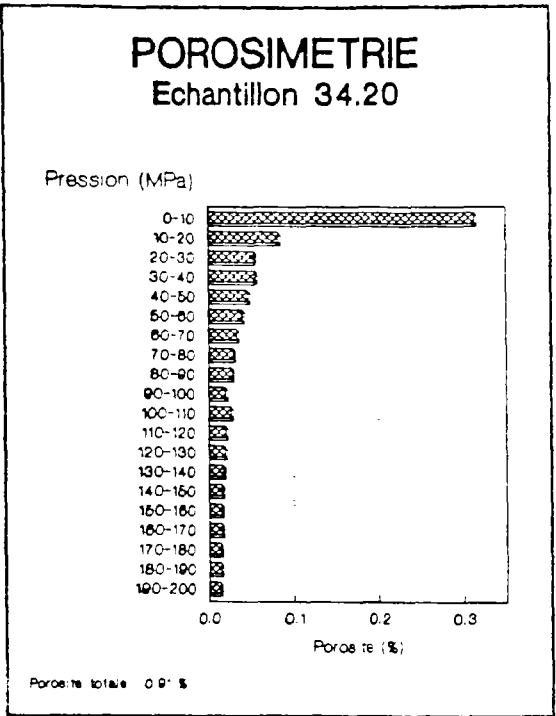
5.4.1. - Introduction :

La lecture des spectres porosimétriques établis de manière classique étant particulièrement peu pratique, nous avons "décumulé" les courbes afin de pouvoir les représenter sous forme d'histogramme.

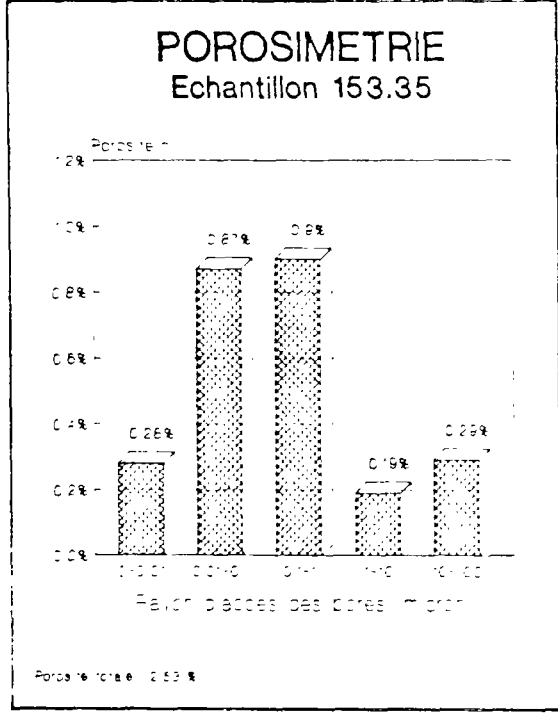
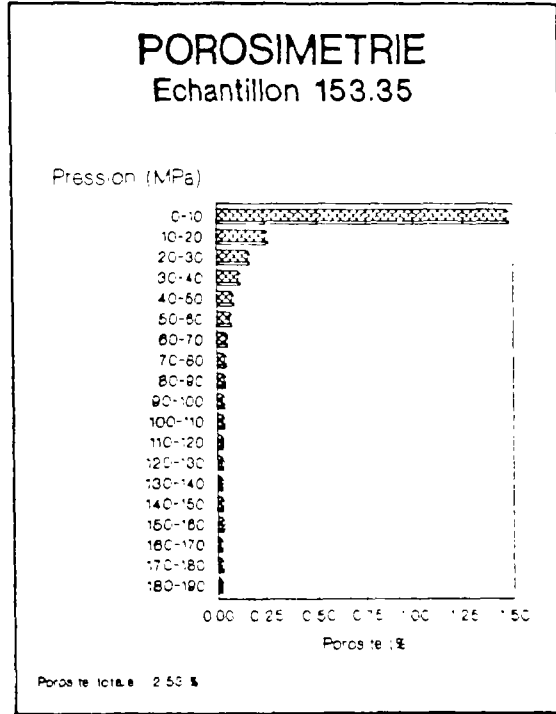
Les courbes porosimétriques ont été "décumulées" suivant des intervalles de classe de deux natures (cf.fig.5.22.a, b et c) :

- intervalles logarithmiques de rayon d'accès au pores : de 0.001 μm à 100 μm
- intervalles constants de pression : 10 MPa.

L'avantage de la représentation des spectres porosimétriques dans un repère semi-logarithmique, est de matérialiser la distribution de la porosité cumulée en fonction du rayon d'accès sans négliger les classes de microposité. Cependant, l'usage veut que l'on retranche la valeur finale de la porosité à toutes les valeurs intermédiaires, ce qui oblige le lecteur à se plier à une gymnastique intellectuelle fastidieuse. Nous pensons que ce type de représentation ne peut suffire à lui seul à bien représenter la distribution des rayons d'accès des pores.



Granite rubéfié (G1) + altération météorique



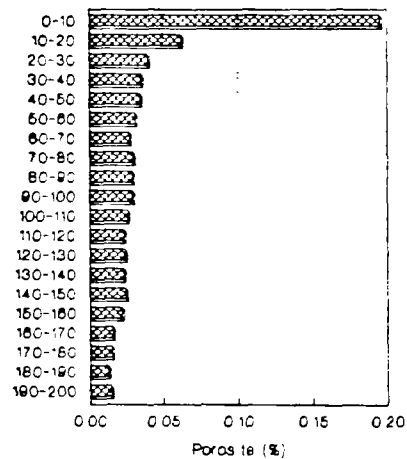
Granite rubéfié (G1)

FIG.5.22.a : représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes.

POROSIMETRIE

Echantillon 220.80

Pression (MPa)

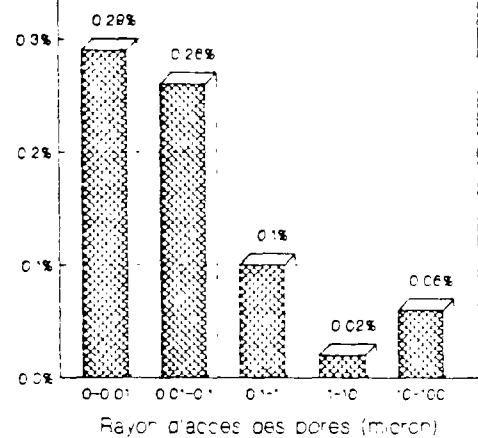


Porosité totale : 0.72 %

POROSIMETRIE

Echantillon 220.80

Porosité



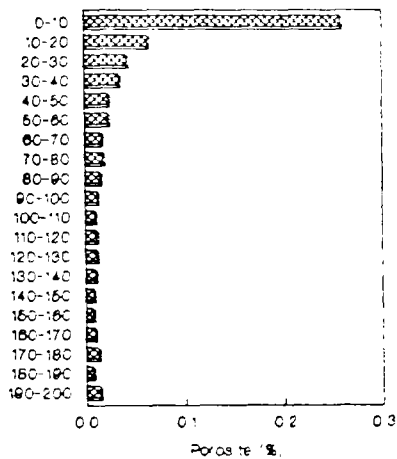
Porosité totale : 0.72 %

Granite rubéfié (G1)

POROSIMETRIE

Echantillon 237.30

Pression (MPa)

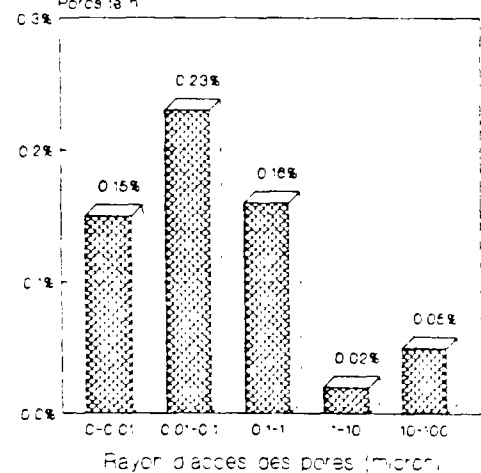


Porosité totale : 0.62 %

POROSIMETRIE

Echantillon 237.30

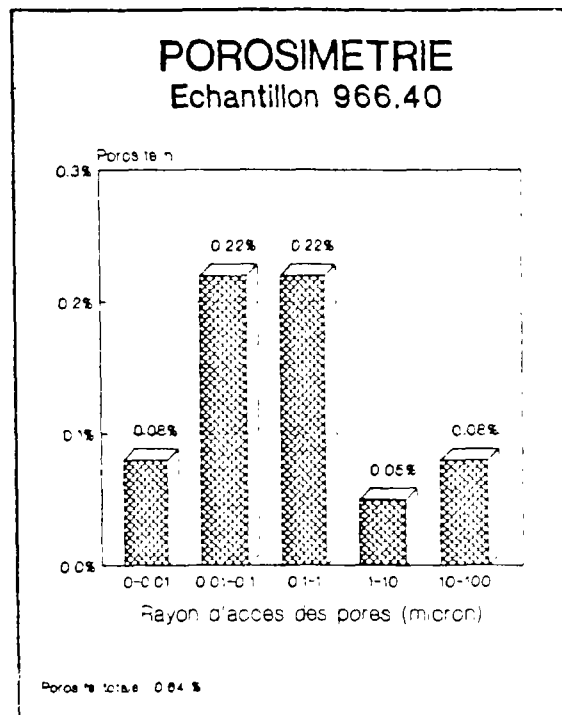
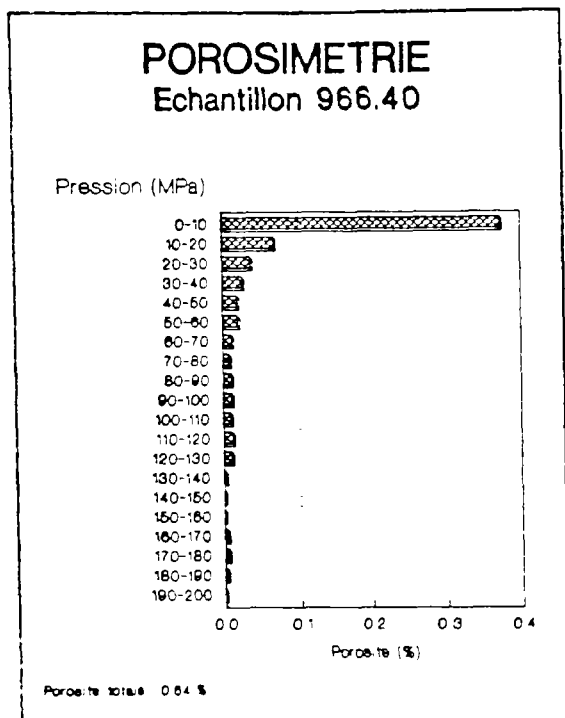
Porosité



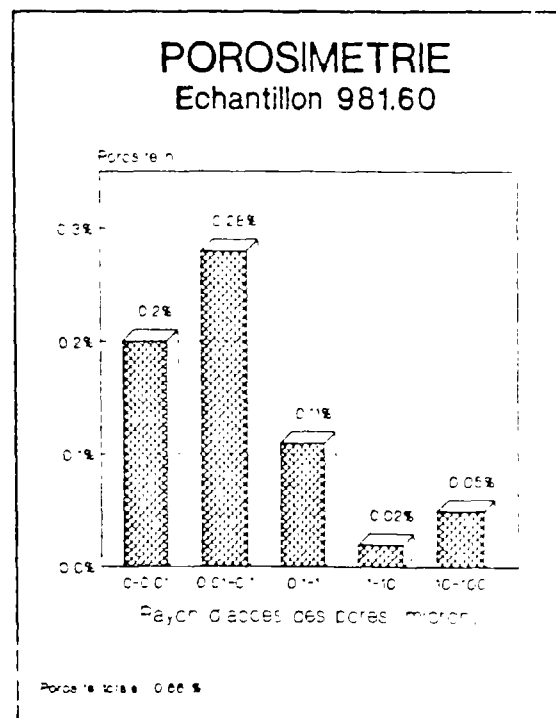
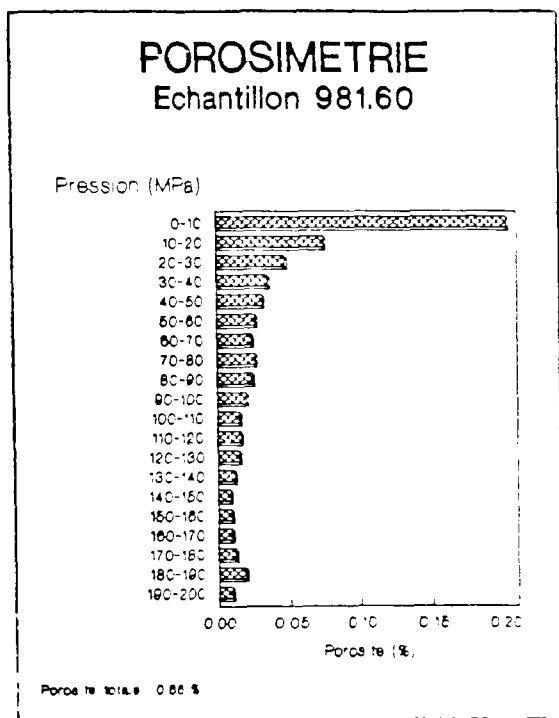
Porosité totale : 0.62 %

Granite gris à l'aspect sain (G1)

FIG.5.22.b : représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes.



Granite gris à l'aspect sain (G2)



Granite rubéfié (G2)

FIG.5.22.c : représentation des spectres porosimétriques sous forme d'histogrammes

5.4.2. - Commentaires :

5.4.2.1. - Comparaison des porosités totales mesurées à l'eau avec celles déterminées à la fin de la 1ère injection de mercure :

Référence	n(%)	nHg(%)	FACIES
34.20	0.75	0.91	G. rubéfié altération météorique G1
153.35	2.22*	2.53	G. rubéfié fissuration colmatée G1
220.80	0.56	0.72	G. rubéfié G1
237.30	0.45	0.62	G. gris à l'aspect sain G1
966.40	0.70	0.64	G. gris à l'aspect sain G2
981.60	0.67	0.66	G. rubéfié G2

Tableau 5.13 : Comparaison des porosités totales à l'eau n (déterminées à partir des courbes de séchage) avec nHg.

* porosité à l'eau où le poids humide de l'échantillon est mesuré après essuyage avec une étoffe humide.

Le tableau 5.13 récapitule les porosités déterminées à partir des courbes de séchages et celles mesurées à la fin des premières courbes d'injection.

On constate que la texture de la roche semble avoir une influence sur les mesures (cf.fig.5.23) :

Il existe une bonne corrélation entre les mesures relatives aux granites de faciès G2 (texture finement grenue), ceci quelque soit l'ordre de grandeur de la porosité totale.

En ce qui concerne le faciès G1 (texture grenue), on constate que les porosités totales déterminées à partir des courbes de séchage sont plus faibles que celles mesurées au mercure. Cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que nous n'avons pas pu utiliser exactement les mêmes échantillons que ceux qui ont servis pour les mesures de porosité totale à l'eau. La relation liant les deux séries de données est la suivante :

$$nHg \approx 1.1 * n \quad (5.31)$$

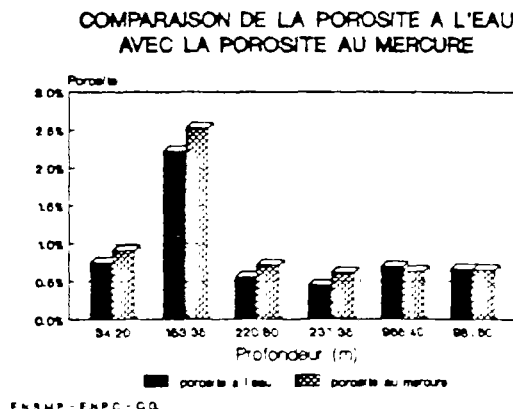
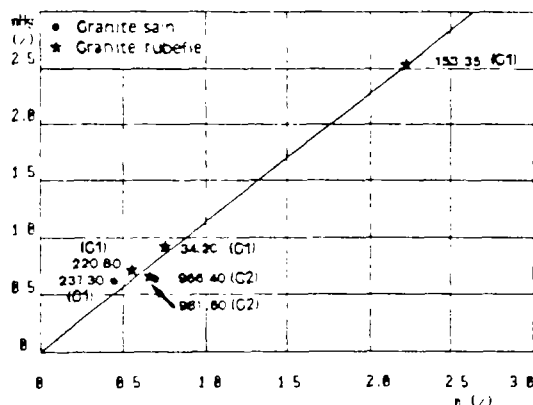


FIG.5.23 : relation entre la porosité totale à l'eau (n) et la porosité au mercure (nHg)

Bien que nous ne puissions pas effectuer des mesures au delà de 200 Mpa, l'allure de certains histogrammes (courbes décumulées à partir d'intervalles de pression constants : 10 MPa) semble indiquer qu'aux très hautes pressions l'injection de mercure est susceptible de se poursuivre et donc d'atteindre des rayons d'accès aux pores inférieurs à 10^{-1} μ m. C'est le cas des échantillons 220.80 et 981.60.

5.4.2.2. - Porosité piégée :

Il existe de façon systématique une quantité de mercure piégée après la première injection. La porosité correspondante est appelée "porosité piégée". Quand la dimension du rayon d'accès d'un pore est inférieure à celle de l'intérieur du pore, le mercure n'est pas en mesure d'évacuer complètement l'espace poreux lors de la détente. On considère généralement que le piégeage du mercure a lieu quand le rayon d'accès au pore est deux fois plus petit que le rayon moyen d'accès de l'espace poreux. Il est clair que ce phénomène est plus particulièrement accentué dans le cas d'une porosité de pores. En ce qui concerne la porosité de fissures, les étranglements sont plus rares et le mercure se retire donc plus facilement.

La porosité piégée des matériaux peut-être mesurée de la manière suivante : après avoir réalisé un cycle injection/retrait, l'échantillon est retiré du dilatomètre et laissé à l'air libre pendant 24 heures, puis pesé. La différence de part et d'autre des ménisques est supposée nulle et la totalité du mercure qui est susceptible d'être libéré, sort de l'échantillon.

Les porosités piégées mesurées sur le granite d'Auriat sont rassemblées dans le tableau 5.14. Elles représentent de 17 à 58 % de la porosité totale.

prof. (1)	nP (2)	nP/nHg (%) (3)	np (4)	np/n (%) (5)	FACIES
34.20	0.32	54	0.39	52	G. rubéfié altération météorique G1
153.35	1.60	58	—	—	G. rubéfié fissuration colmatée G1
220.80	0.12	20	0.27	48	G. rubéfié G1
237.30	0.09	17	0.00	0	G. gris à l'aspect sain G1
966.40	0.19	42	0.30	43	G. gris à l'aspect sain G2
981.60	0.19	40	0.43	64	G. rubéfié G2

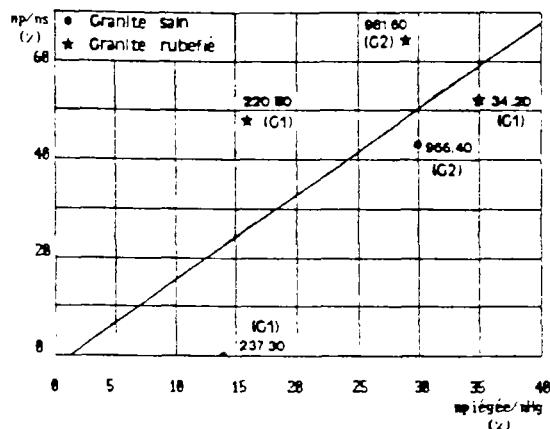
Tableau 5.14 : Porosité piégée et porosité de pores dans le granite d'Auriat.

- (1) : profondeur de prélèvement de l'échantillon
- (2) : porosité piégée en %
- (3) : porosité piégée ramenée à la porosité totale au mercure en %
- (4) : porosité de pores en %
- (5) : porosité de pores ramenée à la porosité totale à l'eau (d'après les courbes de séchages) en %.

Porosité piégée et porosité de pores (cf.fig.5.24) :

En principe, il n'existe pas de relation obligatoire entre la porosité totale nHg et la porosité piégée. Il est cependant possible d'exprimer la porosité piégée en fonction d'autres paramètres.

Si l'on représente dans un repère cartésien la porosité piégée rapportée à la porosité totale au mercure en fonction de la porosité de pores rapportée à la porosité totale à l'eau, on constate qu'il n'existe pas une bonne corrélation entre les deux paramètres.



COMPARAISON DE LA POROSITE PIEGEE AVEC LA POROSITE DE PORES

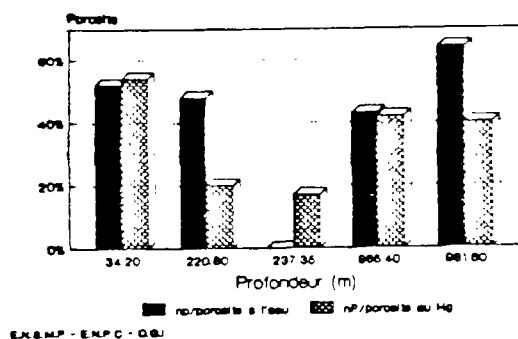
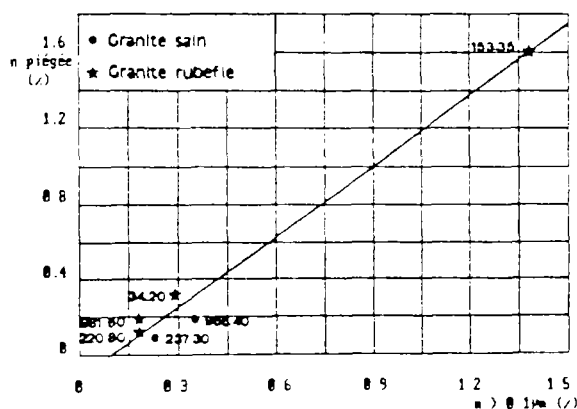


FIG.5.24 : relation entre la porosité de pore (np) et la porosité piégée (npiegee).

En effet, on aurait pu penser que la porosité piégée augmenterait de façon plus régulière avec la porosité de pores.

La représentation des mêmes données sur un histogramme, ne permet pas de mettre en évidence une relation entre les deux types de porosité et les faciès d'altération du granite d'Auriat.

Macro-porosité et porosité piégée (cf.fig.5.25) :



COMPARAISON DE LA POROSITE PIEGEE AVEC LA MACROPOROSITE

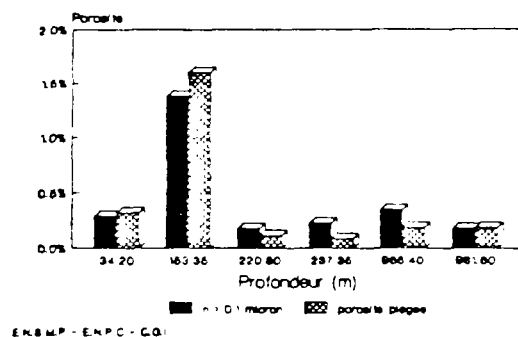


FIG.5.25 : relation entre la macroporosité (n>0.1µm) et la porosité piégée (npiegee)

Il est également intéressant d'essayer de corrélérer la macroporosité avec la porosité piégée. On considère généralement que les phénomènes de piégeage se produisent dans la macro-porosité de l'échantillon étudié. Le terme macro-porosité, comprend toute porosité dont le rayon d'accès est supérieur à 0.1 µm.

Si l'on représente la porosité piégée et la macro-porosité sous forme d'histogramme, on met en évidence le fait que les échantillons 237.35 et 966.40 (granite gris à l'aspect sain) ont une porosité piégée nettement inférieure à la macro-porosité alors que les échantillons rubéfiés ont une porosité piégée supérieure à la macro-porosité (excepté pour l'échantillon 220.80). Cependant, les deux quantités sont toujours du même ordre de grandeur, quelque soit le faciès d'altération de l'échantillon considéré.

5.4.2.3. - Influence du type d'altération de la roche sur l'allure des spectres porosimétriques :

Quelque soit leur type d'altération, les spectres porosimétriques des échantillons considérés ont globalement la même allure. On peut déterminer la hiérarchie suivante dans les classes modales de rayons d'accès aux pores :

- classe 0.01-0.1 μm : pour les échantillons 34.20, 237.30, 966.40 et 981.60.
- classe 0.1-1 μm : pour les échantillons 153.35 et 966.40.
- classe 0.001-0.01 μm : pour l'échantillon 220.80.

En fait, toute la différence a lieu au niveau de la famille de rayon d'accès aux pores comprise entre 0.001 et 0.01 μm .

On constate que pour tous les échantillons de granite rubéfié cette famille se distingue par son effectif relativement important.

Il est intéressant de comparer deux à deux les échantillons des séries suivantes :

- **Faciès G1** : 237.30 (sain) et 220.80 (rubéfaction des plagioclases).
- **Faciès G2** : 966.40 (sain) et 981.60 (rubéfaction des plagioclases).

Dans les deux séries, on dispose d'un échantillon de granite gris sain et d'un homologue qui ne diffère que par la rubéfaction des plagioclases (cf. tableau 5.15).

	POROSITE (%)			
	Faciès G1		Faciès G2	
	sain	rubéfié	sain	rubéfié
Référence	237.30	220.80	966.40	981.60
spectre complet	0.62	0.72	0.64	0.66
0.001-0.01 μm	0.15	0.29	0.08	0.20

Tableau 5.15 : comparaison des effectifs de la classe de rayon d'accès aux pores supérieure à 0.1 μm dans le cas de deux séries de granites sains et rubéfiés de textures G1 et G2.

L'examen du tableau 5.15. montre que les échantillons de granite sain se distinguent par un faible effectif dans la classe de microporosité 0.001-0.01 μm : 24 % de n_i pour 237.30, 12.5 % pour 966.40.

On constate le phénomène inverse pour leurs homologues rubéfiés : 40 % de m_1 pour 220.80, 30 % pour 981.60.

Cela tendrait à montrer que les échantillons dont les plagioclases sont rubéfiés, développeraient une famille caractéristique de porosité très fine ($<10^{-1}$ μm), tout en gardant une porosité totale du même ordre de grandeur que celui du granite sain.

Seule une étude poussée au microscope électronique permettrait éventuellement de visualiser l'existence de cette famille de rayons d'accès aux pores. Malheureusement, l'appareillage dont nous disposons ne possède pas un pouvoir de définition suffisant pour permettre de mettre en évidence la microporosité la plus fine. La visualisation de tels pores et de leur contenu sera éventuellement réalisable quand l'emploi des microscopes de très haut pouvoir de résolution se généralisera (microscope à force atomique ou à effet tunnel).

5.4.3. - Conclusion :

Dans l'optique du stockage profond de déchets de haute activité, l'altération hydrothermale des plagioclases peut être considérée comme un élément positif. En effet, elle a doté la roche de caractéristiques porosimétriques qui pourraient jouer un rôle favorable. Une porosité de pore de rayon d'accès de pore inférieure à 10^{-1} μm (soit 10 Å) pourrait jouer le rôle d'un piège à radionucléides, plutôt que celui d'une voie débouchant sur la biosphère.

Les minéraux d'altération de type argileux (en particulier l'illite), pourraient fixer les radionucléides tout en assurant le colmatage du système de fissuration. Ces caractéristiques faisant défaut au granite sain, on peut se demander si le granite rubéfié ne serait pas, dans sa catégorie, le matériau le plus performant dans le cadre d'un stockage profond.

5.5. - Conclusion du chapitre 5 :

Deux points importants se dégagent de l'étude porosimétrique réalisée sur le granite d'Auriat.

Le premier est d'ordre technique. Il est possible d'établir des spectres porosimétriques sur des matériaux très peu poreux si l'on tient compte de la diminution de volume sous l'effet de la pression de tous les éléments présents dans l'autoclave du porosimètre. La correction à effectuer ne nécessite pas de manipulation expérimentales préalables, mais seulement la connaissance des coefficients de compressibilité en fonction de la pression de chaque élément en présence.

Le second aspect est d'ordre géologique. Dans le cadre d'un stockage nucléaire profond, l'altération hydrothermale du granite d'Auriat n'est pas un obstacle. La faible porosité du granite rubéfié, l'existence d'une microporosité et de produits argileux peuvent faire au contraire du granite rubéfié un matériau plus favorable au stockage que le granite sain.

- CHAPITRE 6 -

- ETUDE DE LA PERMEABILITE DU GRANITE D'AURIAT - - DETERMINATION DES SURFACES SPECIFIQUES A PARTIR DE LA POROSITE ET DE LA PERMEABILITE-

6.1. - Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous proposons de mesurer la perméabilité des échantillons dont nous avons précédemment déterminé la porosité totale et d'en calculer la surface spécifique.

Nous proposons deux modèles considérant des types d'écoulement différents et qui permettent d'accéder à la fois à la surface spécifique et au rayon moyen d'accès des pores (ou à l'épaisseur moyenne des micro-fissures) :

- modèle "feuillets" : écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e ;
- modèle "tubes" : écoulement dans un tube circulaire de rayon r .

Nous confronterons nos valeurs de surface spécifique à celles obtenues par le B.R.G.M (rapport CSDR 81-03, 1981) par mesure directe avec le B.E.T., ainsi que les rayons d'accès des pores calculés à ceux déterminés à partir des spectres porosimétriques.

6.2. - Etude de la perméabilité du granite d'Auriat :

6.2.1. - Principe :

6.2.1.1. - Définition - Loi de Darcy :

La perméabilité caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser circuler les fluides. DARCY qui étudiait la percolation verticale de l'eau à travers un massif filtrant, a montré expérimentalement que le débit par unité de surface était proportionnel à la différence de charge existant entre les deux faces du massif :

$$Q = K * S * \frac{dh}{dx} \quad (6.1)$$

Expression de la loi de Darcy généralisée où :

- | | |
|----|---|
| K | est le coefficient de perméabilité |
| dh | est la perte de charge entre le sommet et la base du massif |
| S | est la section du massif |
| dx | est l'épaisseur du massif |
| Q | est le débit volumique |

En divisant les deux membres de l'équation par S, on fait apparaître la vitesse de filtration \bar{U} , vitesse fictive de la sortie du massif, comme si toute la section du massif était soumise à l'écoulement. Ce dernier paramètre servira dans le cadre de cet exposé à vectorialiser les équations de la loi de Darcy généralisée.

6.2.1.2. - Notion de perméabilité intrinsèque :

Les causes de déplacement des fluides dans le milieu poreux sont :

- les gradients de pression ;
- les forces extérieures (la gravité notamment).

Le résultat qu'exprime la loi de Darcy a donc été généralisé en tenant compte de ces causes, et en introduisant la viscosité du fluide.

$$\vec{U} = - \frac{k}{\eta} * (\text{grad } P + \rho * g * \text{grad } z) \quad (6.2)$$

La perméabilité intrinsèque k ainsi définie se rapporte au milieu poreux, indépendamment des caractéristiques du fluide. Sa dimension est celle d'une surface.

Unités : 1 Darcy est la perméabilité d'un milieu qui laisse passer 1 cm³/s d'un fluide de viscosité 1 centipoise, sous l'effet d'un gradient de pression de 1 atmosphère par centimètre à travers une surface de 1 cm².

$$\begin{aligned} \text{Il vient :} \quad 1 \text{ Darcy (D)} &= 0.987 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \\ 1 \text{ millidarcy (mD)} &= 10^{-1} \text{ Darcy} \end{aligned}$$

6.2.1.3. - Notion de coefficient de perméabilité :

Pour établir la relation entre la perméabilité intrinsèque k et la coefficient de perméabilité K utilisé par les hydrogéologues, il faut exprimer dans l'équation de Darcy généralisée, la vitesse de filtration U en fonction du gradient de perte de charge :

$$\vec{U} = - \frac{k}{\eta} * \text{grad } (P + \rho * g * z) \quad (\text{fluide incompressible}) \quad (6.3)$$

$$\vec{U} = - \frac{k}{\eta} * \rho * g * \text{grad } h \quad (6.4)$$

En comparant les expressions (6.1) et (6.4), on obtient la relation suivante :

$$K = \frac{k}{\eta} * \rho * g \quad (6.5)$$

Unités : K a les dimensions d'une vitesse. Le cm/s est l'unité usuelle. Ce coefficient est fonction du fluide et de sa viscosité (il varie donc avec la température). Pour l'air à 22°C, on aura :

si l'on choisit $k = 1 \text{ mD} = 0.987 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, on obtient $K = 6.94 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$

Référence	k (Darcy)	K (m/s)	Aspect de la roche
12.00	$9.61 \cdot 10^{-7}$	$6.53 \cdot 10^{-13}$	<i>Roche pourrie rubéfiée alt.météo</i>
27.40	$1.08 \cdot 10^{-5}$	$7.34 \cdot 10^{-12}$	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
34.20	$1.37 \cdot 10^{-6}$	$9.31 \cdot 10^{-13}$	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
41.90	$2.12 \cdot 10^{-7}$	$1.44 \cdot 10^{-13}$	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
105.10	$6.20 \cdot 10^{-7}$	$4.22 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
119.65	$1.45 \cdot 10^{-7}$	$9.86 \cdot 10^{-14}$	Granite peu rubéfié
171.12	$7.10 \cdot 10^{-7}$	$4.83 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
220.80	$4.88 \cdot 10^{-7}$	$3.32 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
233.48	$1.67 \cdot 10^{-6}$	$1.14 \cdot 10^{-12}$	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	$3.19 \cdot 10^{-6}$	$2.17 \cdot 10^{-12}$	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	$5.62 \cdot 10^{-7}$	$3.82 \cdot 10^{-13}$	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	$7.30 \cdot 10^{-7}$	$4.96 \cdot 10^{-13}$	Granite gris G1 d'aspect sain
391.53	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$1.30 \cdot 10^{-12}$	Granite rubéfié
402.80	$7.24 \cdot 10^{-7}$	$4.92 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
469.20	$9.95 \cdot 10^{-7}$	$6.76 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
513.88	$2.61 \cdot 10^{-6}$	$1.77 \cdot 10^{-12}$	Granite rubéfié cataclasé
524.10	$1.11 \cdot 10^{-6}$	$7.55 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
535.29	$7.35 \cdot 10^{-7}$	$5.00 \cdot 10^{-14}$	Granite rubéfié
617.18	$1.32 \cdot 10^{-6}$	$8.97 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
643.73	$3.67 \cdot 10^{-7}$	$2.50 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié cataclasé
699.12	$1.26 \cdot 10^{-7}$	$8.57 \cdot 10^{-14}$	<u>Mylonite de couleur sombre</u>
730.30	$3.67 \cdot 10^{-7}$	$2.50 \cdot 10^{-13}$	Granite rubéfié
758.73	$4.71 \cdot 10^{-7}$	$3.20 \cdot 10^{-13}$	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
784.20	$2.18 \cdot 10^{-6}$	$1.48 \cdot 10^{-12}$	Granite rubéfié
854.63	$2.28 \cdot 10^{-6}$	$1.55 \cdot 10^{-12}$	<u>Mylonite rouge</u>
866.00	$1.51 \cdot 10^{-6}$	$1.03 \cdot 10^{-12}$	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	$2.09 \cdot 10^{-6}$	$1.42 \cdot 10^{-12}$	Amas de biotite
976.60	$5.70 \cdot 10^{-7}$	$3.88 \cdot 10^{-13}$	<u>Mylonite rouge</u>

Tableau 6.1 : Coefficients de perméabilité maximaux K et perméabilités intrinsèques k, du granite d'Auriat (ces valeurs sont les moyennes des mesures obtenues avec les pressions d'injection de 2 et 3 MPa).

6.2.1.4. - Validité de la loi de Darcy :

La loi de Darcy s'applique à un liquide considéré par hypothèse incompressible. Dans le cas d'un gaz, on fait l'hypothèse que la loi de Darcy infinitésimale, soit l'équation (6.1) en notation différentielle, est toujours vérifiée. On obtient alors l'égalité suivante :

$$Q = \frac{S * k}{\eta * l} * \frac{P_1^2 - P_2^2}{2 * P_{atm}} \quad (6.6)$$

Moyennant quelques hypothèses décrites dans l'annexe 5, on conclut que la loi de Darcy avec termes correctifs est inutile. On a donc employé la loi de Darcy appliquée aux gaz sous sa forme la plus simple :

$$k = \frac{2 * \eta * Q * l}{S} * \frac{P_{atm}}{P_1^2 - P_2^2} \quad (6.7)$$

6.2.2. - Acquisition des données :

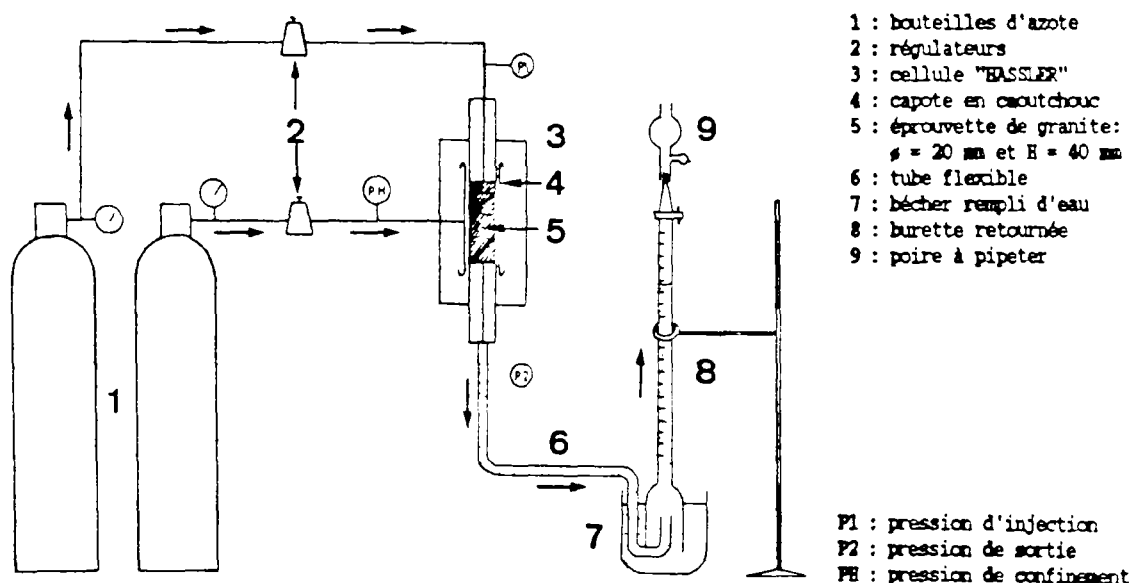


FIG.6.1 : dispositif de mesure de la perméabilité du granite d'Auriat.

Nous avons mesuré la perméabilité en écoulement parallèle, c'est à dire d'une section droite à l'autre d'un échantillon cylindrique de diamètre 20 mm et de hauteur 40 mm.

Le choix du dispositif expérimental a été imposé par la très faible perméabilité du granite.

Nous avons réalisé un montage comprenant un perméamètre à cellule "Hassler"(cf.fig.6.1). Le principe est le suivant : la carotte est traversée par un courant d'azote sous forte pression (pression d'injection). En aval on mesure le débit Q, soit à l'aide d'un débitmètre à bille, soit, le plus souvent, à l'aide d'une burette de précision connectée à la cellule "Hassler"(cf.fig.6.2). On calcule alors la perméabilité intrinsèque avec l'expression (6.7).

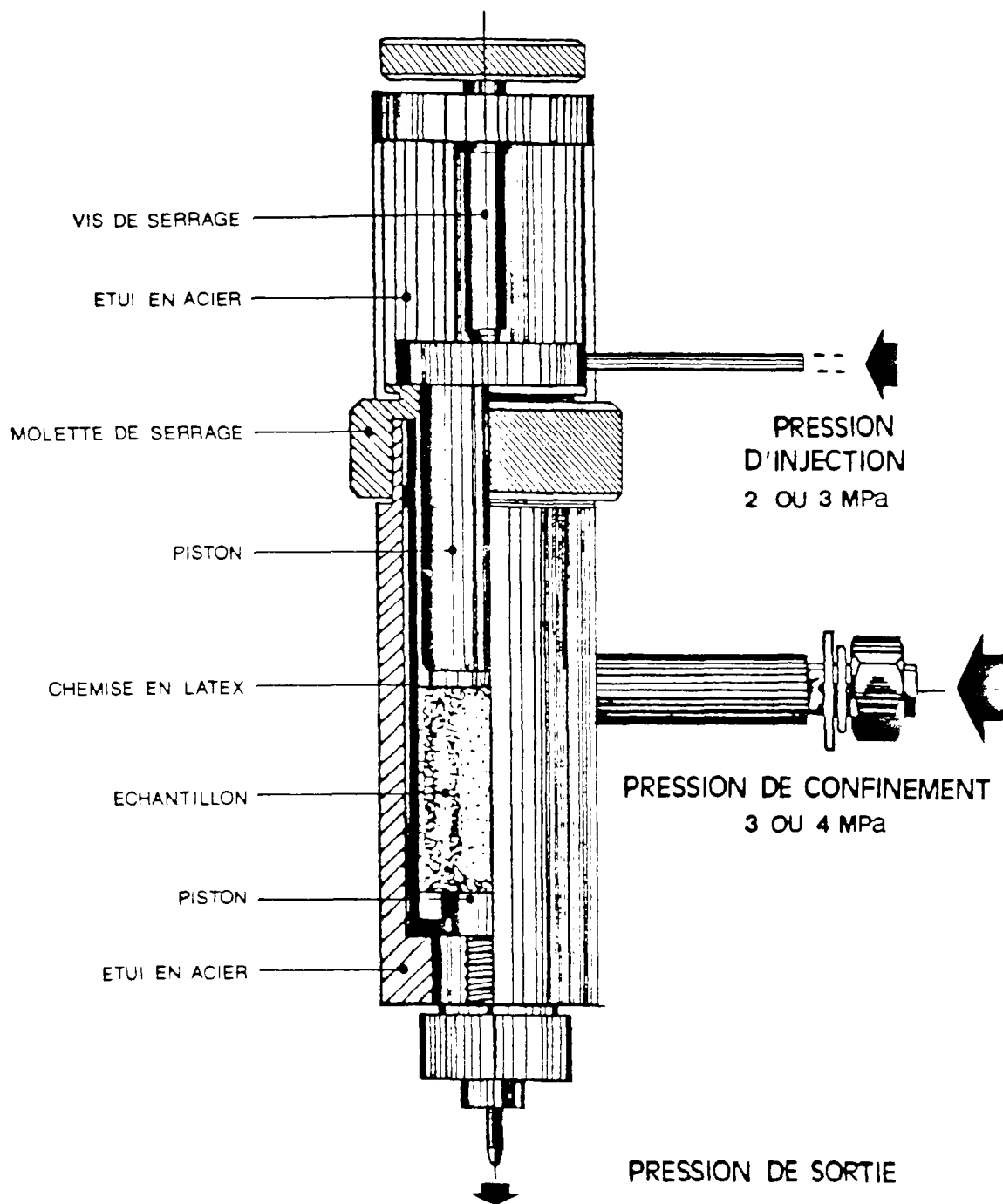
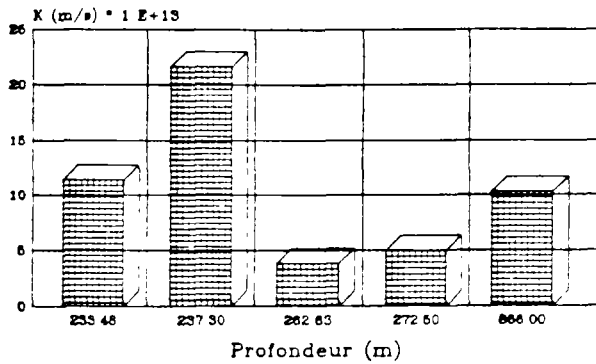


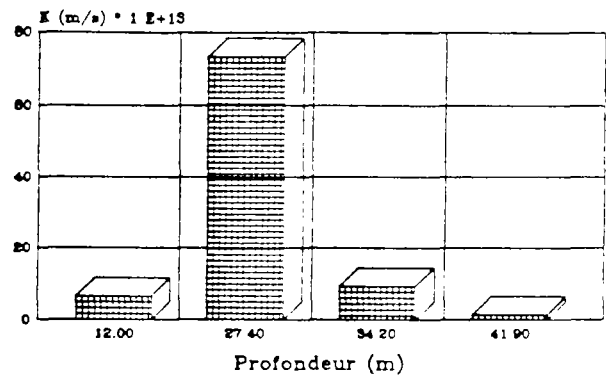
FIG.6.2: SCHEMA D'UNE CELLULE «HASSLER»

GRANITE GRIS A L'ASPECT SAIN
Coefficients de perméabilité K (m/s)



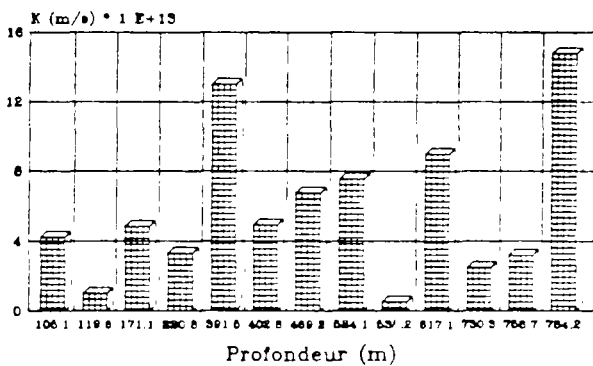
Epruvettes diamètre 30 mm hauteur 40 mm

GRANITE RUBEFIE ALTERATION METEORIQUE
Coefficients de perméabilité K (m/s)



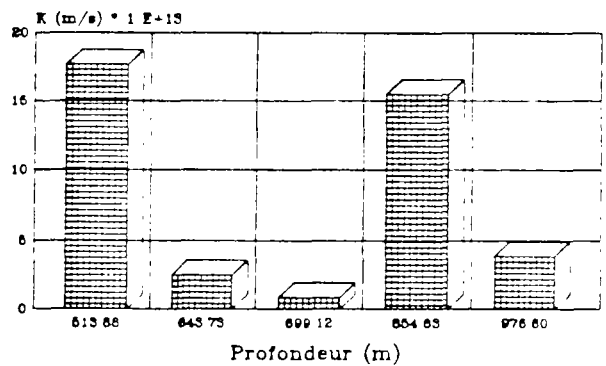
Epruvettes diamètre 30 mm hauteur 40 mm

GRANITE RUBEFIE
Coefficients de perméabilité K (m/s)



Epruvettes diamètre 30 mm hauteur 40 mm

MYLONITES
Coefficients de perméabilité K (m/s)



Epruvettes diamètre 30 mm hauteur 40 mm

FIG.6.3 : relation entre les coefficients de perméabilité et les faciès d'altération des échantillons étudiés.

Nous avons effectué pour chaque échantillon de granite, une mesure à 2 MPa puis à 3 MPa de pression d'injection. Les résultats qui figurent dans le tableau 6.1 sont les moyennes des perméabilités mesurées à 2 et 3 MPa.

6.2.3. - Commentaires :

6.2.3.1. - Fiabilité des mesures :

La très faible perméabilité du granite rend les mesures très délicates. La méthode que nous avons choisie pour quantifier la perméabilité ne peut prétendre refléter exactement la réalité. Cependant les ordres de grandeurs sont généralement respectés entre nos données et celles déjà existantes (cf.chapitre -1-, tableau 1.5).

6.2.3.2. - Relation entre perméabilité et faciès d'altération (cf.fig.6.3) :

Malgré les réserves que nous avons formulées au sujet de la fiabilité des mesures, les valeurs de la perméabilité semblent se regrouper de manière cohérente en fonction des faciès d'altération que nous avons définis. Nous avons construit pour chaque faciès d'altération un histogramme des perméabilités mesurées en fonction de la profondeur.

On constate qu'en moyenne les perméabilités les plus faibles sont rencontrées dans le faciès rubéfié. Les moins bonnes performances du granite gris à l'aspect sain peuvent s'expliquer par l'existence d'une microfissuration non colmatée.

6.2.3.3. - Perméabilité - Porosité (cf.fig.6.4 et 6.5) :

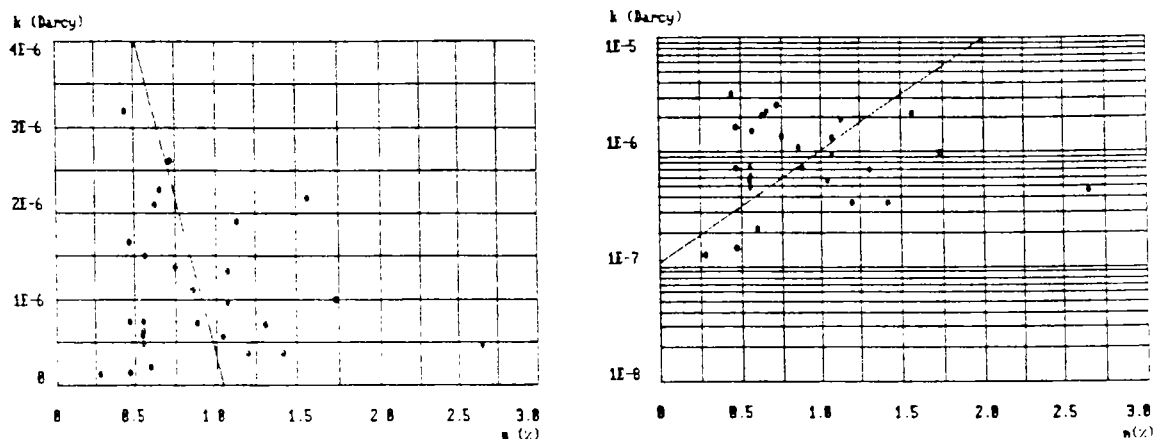


FIG.6.4 : relation entre la perméabilité k et la porosité totale à l'eau n .

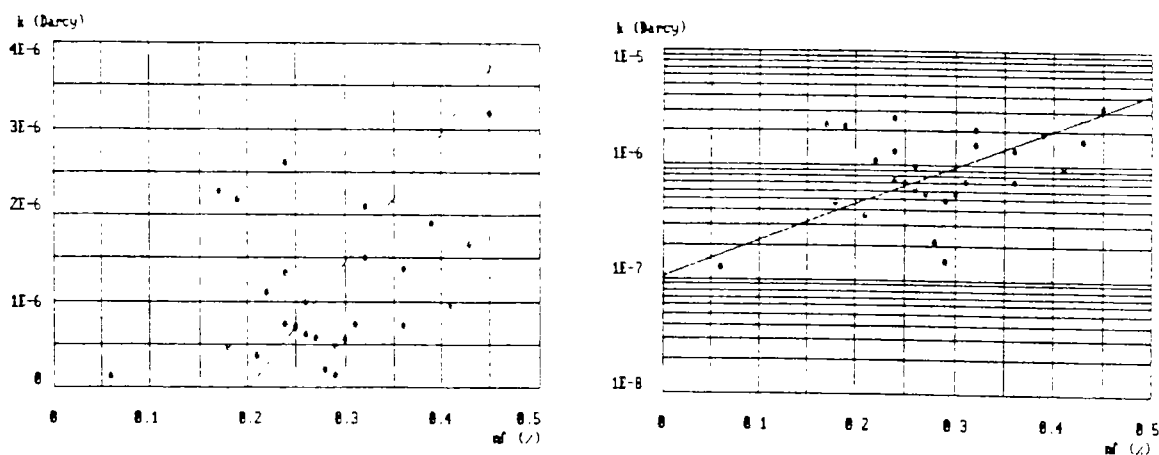


FIG.6.5 : relation entre la perméabilité k et la porosité de fissure n_f

Le tableau 6.1 montre qu'il ne semble pas exister de relation nette entre les perméabilités et les faciès d'altération.

La fig.6.4.b représente les perméabilités en fonction des porosités totales dans un repère semi-logarithmique. S'il existe une corrélation très moyenne ($r = -0.870$) lorsque l'on exprime n par rapport au logarithme de la perméabilité, celle-ci est franchement médiocre dans un repère cartésien ($r = 0.677$), la droite de régression ayant même une pente négative (cf.fig.6.4.a).

Si l'on représente la perméabilité en fonction de la porosité de fissure n_f , on obtient un meilleur coefficient de corrélation avec $r = -0.947$ dans un repère semi-logarithmique (cf.fig.6.5.b), et $r = 0.836$ dans une représentation cartésienne (cf.fig.6.5.a).

6.2.4. - Conclusion :

Les valeurs de la perméabilité sont comprises entre $7 \cdot 10^{-1}$ et $1 \cdot 10^{-1}$ Darcy.

Bien que le dispositif expérimental permette de mesurer des débits peu importants, ceux-ci sont si faibles que la précision des mesures peut en souffrir. Les écarts entre les différentes valeurs permettent cependant d'établir des regroupements entre le faciès d'altération des échantillons étudiés et les valeurs des coefficients de perméabilité correspondants. De manière générale, il semble que le granite rubéfié soit le moins perméable, sa fissuration étant largement colmatée.

6.3. - Détermination des surfaces spécifiques :

6.3.1 - Introduction :

Nous avons utilisé les données précédentes pour déterminer les surfaces spécifiques développées par les échantillons sur lesquels nous avons déjà mesuré perméabilité et porosité totale.

Les surfaces spécifiques ont été calculées à partir de 2 modèles :

- un modèle considérant un écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e .
- un modèle considérant un écoulement dans un tube circulaire.

6.3.2 - Description des modèles de détermination des surfaces spécifiques :

6.3.2.1. - Modèle considérant un écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e :

La fissure est supposée s'étendre indéfiniment dans le plan horizontal x,y , son ouverture e étant orientée selon l'axe z . L'écoulement parallèle se fait dans la direction x (cf.fig.6.6).

Le détail des calculs figure dans l'annexe 5.

Pour un échantillon donné, on obtient le débit suivant :

$$Q = \frac{n * e^2}{12} * \frac{S}{\eta} * \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (6.8)$$

Q : débit à travers l'éprouvette	e : épaisseur de la fissure
n : porosité totale	l : hauteur de l'éprouvette
P_1 : pression en amont	S : section de l'éprouvette
P_2 : pression en aval	η : viscosité du fluide

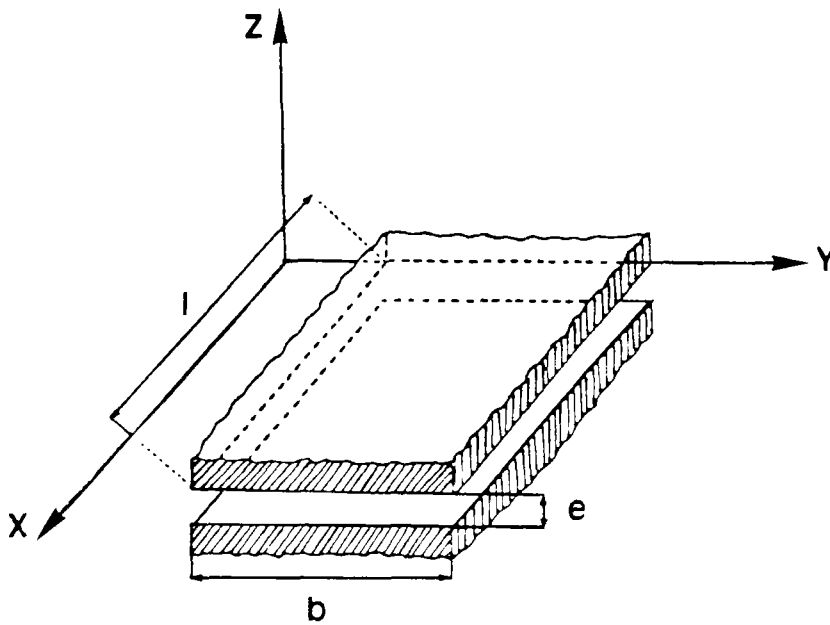


FIG.6.6 : modèle considérant un écoulement parallèle dans une fissure d'épaisseur e

Lien perméabilité - porosité :

En comparant la relation (6.8) avec la loi de Darcy il vient :

$$k = \frac{n * e^2}{12} \quad (6.9)$$

d'où :

$$Q = k * \frac{S}{\eta} * \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (6.10)$$

Lien avec la surface spécifique :

La surface spécifique peut s'exprimer par la relation suivante :

$$S_{sf} = \frac{\text{Surface totale des pores}}{\text{Volume total}} \quad (6.11)$$

Soit (cf.fig.6.6) :

$$S_{sf} = \frac{2*(e + b)*l*N}{b*h*l} = \frac{2*N}{h} \quad (e \ll b) \quad (6.12)$$

$$\text{Or } n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} = \frac{N*e*b*l}{b*h*l} = \frac{N*e}{h} \quad (6.13)$$

$$\text{d'où : } \frac{N}{h} = \frac{n}{e} \quad (6.14)$$

En remplaçant (6.14) dans l'expression (6.12), on obtient la relation suivante :

$$Ss_f = \frac{2 \cdot n}{e} \quad (6.15)$$

D'autre part, on tire e de la relation (6.9) :

$$e = \left[\frac{12 \cdot k}{n} \right]^{1/2} \quad (6.16)$$

Finalement, des expressions (6.15) et (6.16), on tire une relation qui permet d'exprimer la surface spécifique Ss_f , en fonction de la porosité totale n et de la perméabilité intrinsèque k .

$$Ss_f = \frac{n^{3/2}}{k^{1/2} \cdot \sqrt{3}} \quad (6.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Unités :} \quad k &= \text{cm}^2 \\ Ss &= \text{cm}^2/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

On peut également exprimer la surface spécifique Ss_f en m^2/g . Pour cela, il faut multiplier Ss_f exprimé en cm^2/cm^3 , par $10^{-4}/2.7$

6.3.2.2. - Modèle considérant un écoulement dans un tube circulaire :

Le second modèle considère un écoulement dans un tube circulaire. Dans ce cas, on utilise la formule de Poiseuille. Le milieu poreux est idéalisé par N canaux circulaire de rayon r , tous parallèles entre eux et traversant une matrice imperméable (cf.fig.6.7).

Le détail des calculs figure dans l'annexe 5.

Dans ce cas de figure, le débit poreux est de la forme :

$$Q = S \cdot \frac{n \cdot r^2}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (6.18)$$

Q : débit à travers l'éprouvette	r : rayon des canaux
n : porosité totale	l : hauteur de l'éprouvette
P_1 : pression en amont	S : section de l'éprouvette
P_2 : pression en aval	η : viscosité du fluide

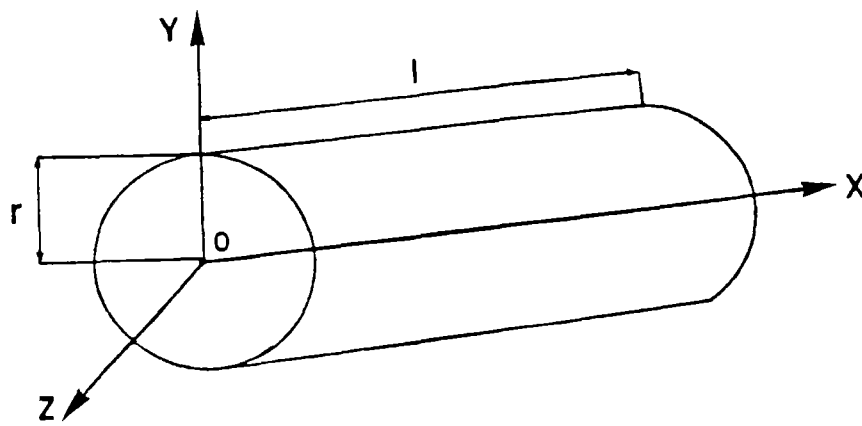


FIG.6.7 : modèle considérant un écoulement dans un tube circulaire

Lien porosité - perméabilité :

En identifiant le débit (6.18) à celui exprimé dans l'équation de Darcy, il vient :

$$k = \frac{n \cdot r^2}{8} \quad (6.19)$$

Lien avec la surface spécifique :

La surface spécifique S_s , peut s'exprimer par la relation suivante (cf.fig.6.7) :

$$S_{sp} = \frac{2 \cdot n \cdot r \cdot l \cdot N}{n \cdot r \cdot l} = \frac{2 \cdot N \cdot n \cdot r}{S} \quad (6.20)$$

$$\text{Or } n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} = \frac{N \cdot n \cdot r^2}{S} \quad (6.21)$$

$$\text{D'où : } \frac{N}{S} = \frac{n}{n \cdot r^2} \quad (6.22)$$

En remplaçant (6.22) dans l'expression (6.20), on obtient :

$$S_{sp} = \frac{2 \cdot n}{r} \quad (6.23)$$

D'autre part, on tire le rayon r des canaux circulaires de la relation (6.19) :

$$r = \left[\frac{8 \cdot k}{n} \right]^{1/2} \quad (6.24)$$

Finalement, des expressions (6.23) et (6.24), on tire une relation qui permet d'exprimer la surface spécifique S_s , en fonction de la porosité totale et de la perméabilité intrinsèque k :

$$S_{sp} = \frac{n^{3/2}}{k^{1/2} \cdot \sqrt{2}} \quad (6.25)$$

Unités : $k = \text{cm}^2$
 $S_s = \text{cm}^2/\text{cm}^3$

On peut également exprimer la surface spécifique S_s , en m^2/g . Pour cela, il faut multiplier S_s , exprimé en cm^2/cm^3 , par $10^{-4}/2.7$

6.3.2.3. - Synthèse des deux modèles :

Le modèle idéalisé par des feuillets est censé rendre compte d'un écoulement à travers un espace poreux de type fissural alors que celui qui est constitué de tube parallèles, est plus représentatif d'un espace poreux de type pore.

Etant donné que l'espace poreux du granite d'Auriat est à la fois constitué d'un réseau de fissures et de tubes, on pourrait moyenner les résultats obtenus par les deux modèles :

$$S_s = \frac{S_{s_f} + S_{s_t}}{2} \quad (6.26)$$

Une autre solution serait d'affecter des coefficients A et B à S_{s_f} et S_{s_t} puis de sommer le tout :

$$S_s = A \cdot S_{s_f} + B \cdot S_{s_t} \quad (6.27)$$

Les coefficients A et B pourraient prendre les valeurs n_f/n et n_t/n , quantités sans dimension, qui marqueraient l'influence de chacun des types de porosité.

Si l'on considère l'incertitude expérimentale liée à la détermination des perméabilités, à laquelle s'ajoutent les approximations nécessaires à la formulation de la surface spécifique dans les modèles "feuillets" et "tubes", il semble plus raisonnable d'adopter l'expression (6.26) de la surface spécifique.

6.3.3. - Exploitation des résultats :

6.3.3.1. - Présentation des résultats (cf. tableau.6.2) :

On constate que le granite d'aspect sain possède une surface spécifique généralement faible (excepté pour l'échantillon 262.63 : $S_s = 0.42 \text{ m}^2/\text{g}$) : entre 0.06 et 0.11 m^2/g .

Les surfaces spécifiques du granite cataclaté ou mylonitisé restent faibles (excepté pour l'échantillon 643.73 qui est fissuré $S_s = 0.77 \text{ m}^2/\text{g}$) : 0.10 à 0.15 m^2/g .

Le granite rubéfié ayant subi une altération météorique a une surface spécifique comprise entre 0.17 et 0.32 m^2/g .

En ce qui concerne le granite rubéfié non fissuré, les surfaces spécifiques moyennes varient de 0.16 à 0.65 m^2/g .

Référence	K (Darcy)	n(%)	SS _p m ² /g	SS _f m ² /g	Ss m ² /g	Aspect de la roche
12.00	0.96 10 ⁻⁶	1.07	0.35	0.28	0.32	Roche pourrie rubéfiée alt.météo
27.40	0.11 10 ⁻⁴	1.66	0.21	0.17	0.19	G.rubéfié altération météorique
34.20	0.14 10 ⁻⁵	0.75	0.19	0.15	0.17	G.rubéfié altération météorique
41.90	0.21 10 ⁻⁶	0.60	0.32	0.26	0.29	G.rubéfié altération météorique
105.10	0.62 10 ⁻⁶	0.56	0.17	0.14	0.16	Granite rubéfié
119.65	0.15 10 ⁻⁶	0.47	0.24	0.19	0.22	Granite peu rubéfié
171.12	0.71 10 ⁻⁶	1.31	0.55	0.45	0.50	Granite rubéfié
220.80	0.49 10 ⁻⁶	0.56	0.18	0.15	0.17	Granite rubéfié
233.48	0.17 10 ⁻⁵	0.45	0.09	0.07	0.08	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	0.32 10 ⁻⁵	0.47	0.06	0.05	0.06	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	0.56 10 ⁻⁶	1.04	0.46	0.37	0.42	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	0.73 10 ⁻⁶	0.47	0.12	0.09	0.11	Granite gris G1 d'aspect sain
391.53	0.19 10 ⁻⁵	1.13	0.35	0.29	0.32	Granite rubéfié
402.80	0.72 10 ⁻⁶	0.88	0.30	0.24	0.27	Granite rubéfié
469.20	0.10 10 ⁻⁵	1.73	0.72	0.58	0.65	Granite rubéfié
513.88	0.26 10 ⁻⁵	0.72	0.12	0.10	0.11	Granite rubéfié cataclasé
524.10	0.11 10 ⁻⁵	0.86	0.25	0.20	0.23	Granite rubéfié
535.29	0.74 10 ⁻⁶	0.56	0.31	0.25	0.28	Granite rubéfié
617.18	0.13 10 ⁻⁵	1.07	0.29	0.24	0.27	Granite rubéfié
643.73	0.37 10 ⁻⁶	1.42	0.85	0.69	0.77	Granite rubéfié cataclasé
699.12	0.13 10 ⁻⁶	0.28	0.10	0.09	0.10	Mylonite de couleur sombre
730.30	0.37 10 ⁻⁶	1.20	0.59	0.48	0.54	Granite rubéfié
758.73	0.47 10 ⁻⁶	2.65	1.55	1.26	1.41	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
784.20	2.18 10 ⁻⁶	1.57	0.41	0.33	0.37	Granite rubéfié
854.63	0.23 10 ⁻⁵	0.66	0.11	0.09	0.10	Mylonite rouge
866.00	0.15 10 ⁻⁵	0.57	0.11	0.09	0.10	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	0.21 10 ⁻⁵	0.63	0.11	0.09	0.10	Anas de biotite
976.60	0.57 10 ⁻⁶	0.55	0.16	0.13	0.15	Mylonite rouge

Tableau 6.2 : Surfaces spécifiques minimales calculées à partir de la porosité totale n et de la perméabilité intrinsèque k.

SS_p : surface spécifique calculée d'après le modèle "tubes".

SS_f : surface spécifique calculée d'après le modèle "feuillets".

Ss : moyenne de SS_p et SS_f.

6.3.3.2. - Comparaison des surfaces spécifiques obtenues par mesure directe et par le calcul :

Le B.R.G.M (1981) a effectué des mesures de la surface spécifique au krypton sur quelques échantillons du granite d'Auriat (cf. tableau 6.3). Cette méthode de mesure est réputée pour sa précision mais aussi pour ses difficultés de mise en oeuvre. On constate que les résultats expérimentaux sont comparables aux valeurs que nous avons calculées à partir de n et de k .

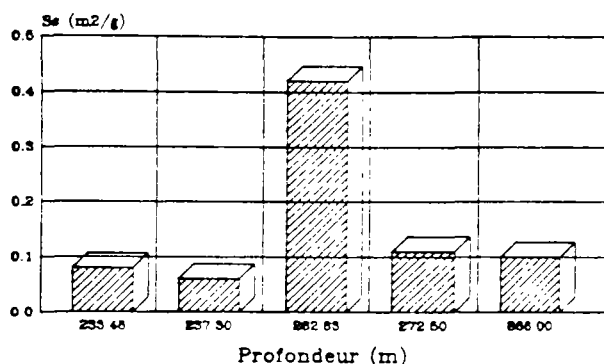
Ainsi, pour le faciès altération météorique le B.R.G.M a mesuré une surface spécifique comprise entre 0.38 et 0.40 m^2/g (échantillon 0, profondeur : 12.05), pour 0.32 m^2/g d'après nos calculs (échantillon 12.00). L'échantillon 223 (profondeur : 999.00 m) qui appartient au faciès sain, a une surface spécifique mesurée de 0.11 m^2/g . Nous avons calculé pour l'échantillon 866.00 (faciès sain G2) une surface spécifique de 0.10 m^2/g .

Référence	Profondeur (m)	$n(\%)$	Ss m^2/g
0	12.05	(1) 1.20	0.40
		(2) 2.02	0.38
43	512.55	(1) 2.96	0.42
		(2) 2.99	0.40
49	654.00	(1) 0.90	0.44
		(2) 0.91	0.40
71	901.00	1.06	0.31
220	921.00	1.19	0.17
74	952.20	(1) 0.88	0.17
		(2) 0.86	0.16
999	999.00	0.87	0.11
80	1003.15	(1) 0.80	0.11
		(2) 0.80	0.13

Tableau 6.3 : Mesures de surface spécifique au krypton de quelques échantillons du granite d'Auriat.
 (1) : 1^{ère} mesure, (2) : 2^{ème} mesure.
 Les porosités sont déduites des spectres de porosité au mercure.
 (source : B.R.G.M).

GRANITE GRIS A L'ASPECT SAIN

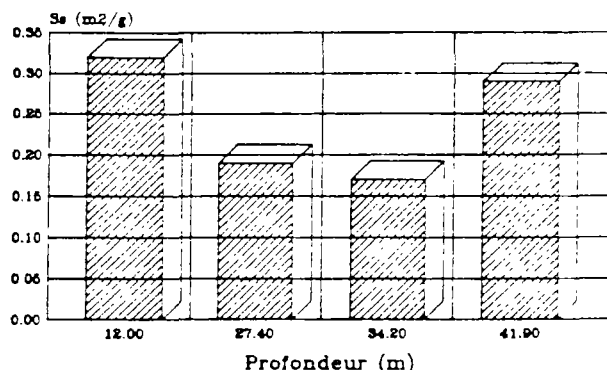
Surfaces spécifiques (m²/g)



Eprouvettes diamètre 20 mm hauteur 40 mm

GRANITE RUBEFIÉ ALTERATION METEORIQUE

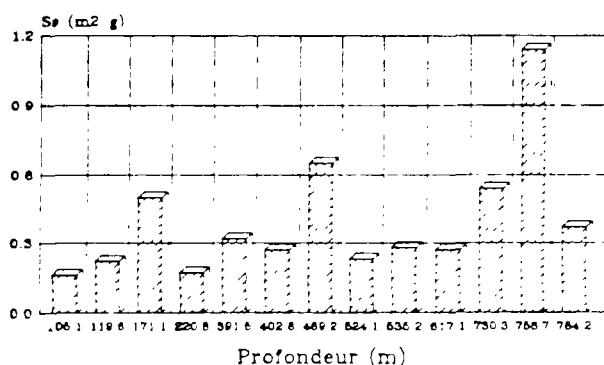
Surfaces spécifiques (m²/g)



Eprouvettes diamètre 20 mm hauteur 40 mm

GRANITE RUBEFIÉ

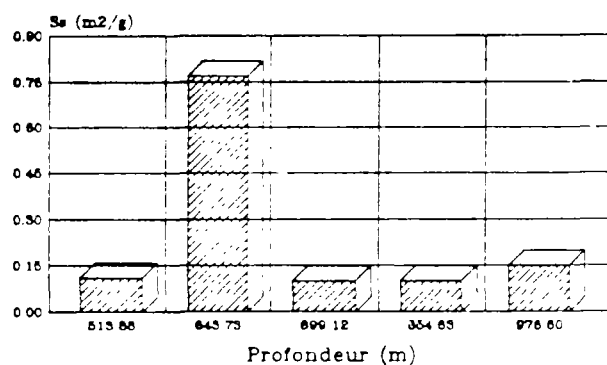
Surfaces spécifiques (m²/g)



Eprouvettes diamètre 20 mm hauteur 40 mm

MYLONITES

Surfaces spécifiques (m²/g)



Eprouvettes diamètre 20 mm hauteur 40 mm

FIG.6.8 : relation entre les surfaces spécifiques et les faciès d'altération des échantillons étudiés.

6.3.3.3. - Relation entre la surface spécifique et le faciès d'altération (cf.fig.6.8) :

1) cas du granite sain :

Les surfaces spécifiques sont très faibles ($0.06 < Ss < 0.11 \text{ m}^2/\text{g}$) excepté pour l'échantillon 269.63 qui a probablement subi une fissuration artificielle lors du serrage de l'éprouvette dans la cellule Hassler.

2) cas des mylonites :

Les surfaces spécifiques restent faibles ($0.10 < Ss < 0.15 \text{ m}^2/\text{g}$), mais légèrement supérieures à celles des granites sains. L'échantillon 643.73 fait exception à cette règle car il a probablement subi un serrage trop important dans la cellule Hassler.

3) cas du granite rubéfié repris par une altération météorique :

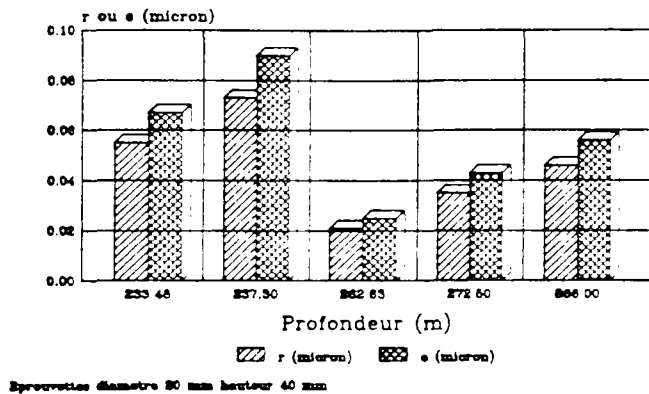
Les surfaces spécifiques sont comprises entre 0.17 et $0.32 \text{ m}^2/\text{g}$.

4) cas du granite rubéfié :

Les surfaces spécifiques sont comprises entre 0.16 et $0.65 \text{ m}^2/\text{g}$ quand le granite n'est pas notoirement fissuré.

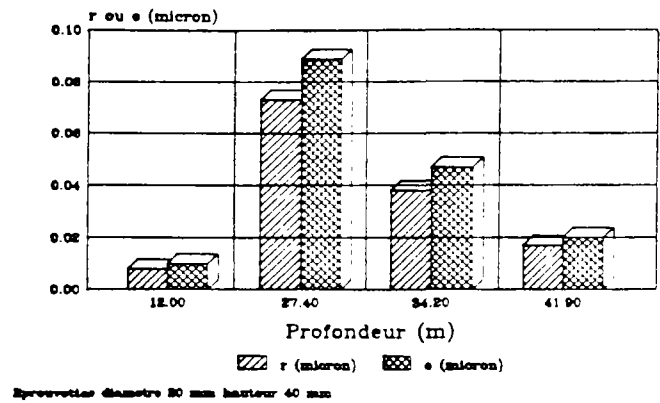
GRANITE SAIN

r : rayon d'accès (modele"tube")
e : épaisseur fissure (modele"feuillet")



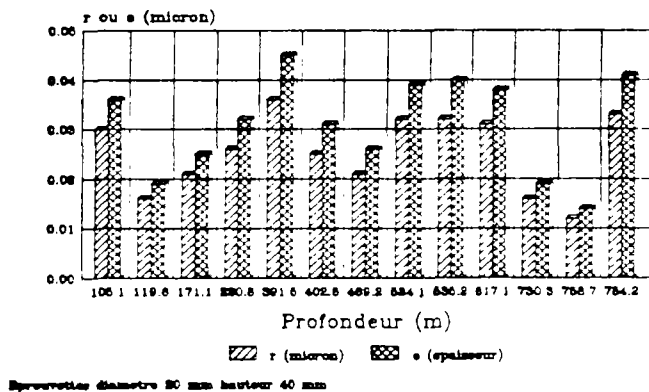
GRANITE RUBEFIE ALTERATION METEORIQUE

r : rayon d'accès (modele"tube")
e : épaisseur fissure (modele"feuillet")



GRANITE RUBEFIE

r : rayon d'accès (modele"tube")
e : épaisseur fissure (modele"feuillet")



MYLONITES

r : rayon d'accès (modele"tube")
e : épaisseur fissure (modele"feuillet")

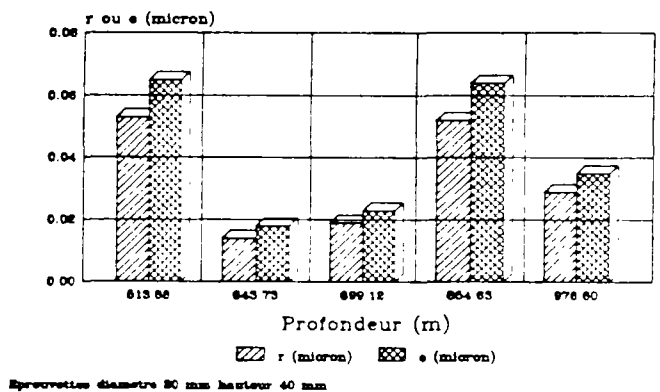


FIG.6.9 : relation entre les rayons moyens et d'accès aux pores, les épaisseurs moyennes des microfissures et les faciès d'altération.

6.3.3.4. - Calcul des rayons moyens d'accès aux pores - interprétation des résultats (cf.fig.6.9) :

Nous avons calculé à partir des expressions (6.16) et (6.24) les épaisseurs moyennes e des fissures ainsi que les rayons moyens r d'accès des pores (cf.tableau 6.4) :

- modèle "tubes" : $0.073 > r > 0.008 \mu\text{m}$
- modèle "feuillet" : $0.090 > e > 0.010 \mu\text{m}$

Les valeurs de rayons d'accès des pores calculés sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus en prenant la moyenne à partir des courbes porosimétriques décumulées (cf.tableau 6.5). On notera dans ce cas que pour une même texture, les échantillons rubéfiés (220.80 (G1) et 981.60 (G2)) ont un rayon moyen d'accès des pores généralement plus fins que celui du granite gris à l'aspect sain (237.30 (G1) et 966.40 (G2)).

Profondeur (m)	K (Darcy)	n(%)	r (μ m)	e (μ m)	ASPECT DE LA ROCHE
12.00	$0.96 \cdot 10^{-6}$	1.07	0.008	0.010	<i>Roche pourrie rubéfiée alt.météo</i>
27.40	$0.11 \cdot 10^{-4}$	1.66	0.073	0.089	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
34.20	$0.14 \cdot 10^{-5}$	0.75	0.038	0.047	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
41.90	$0.21 \cdot 10^{-6}$	0.60	0.017	0.020	<i>G.rubéfié altération météorique</i>
105.10	$0.62 \cdot 10^{-6}$	0.56	0.030	0.036	Granite rubéfié
119.65	$0.15 \cdot 10^{-6}$	0.47	0.016	0.019	Granite peu rubéfié
171.12	$0.71 \cdot 10^{-6}$	1.31	0.021	0.025	Granite rubéfié
220.80	$0.49 \cdot 10^{-6}$	0.56	0.026	0.032	Granite rubéfié
233.48	$0.17 \cdot 10^{-5}$	0.45	0.055	0.067	Granite gris G1 d'aspect sain
237.30	$0.32 \cdot 10^{-5}$	0.47	0.073	0.090	Granite gris G1 d'aspect sain
262.63	$0.56 \cdot 10^{-6}$	1.04	0.021	0.025	Granite gris G1 d'aspect sain
272.50	$0.73 \cdot 10^{-6}$	0.47	0.035	0.043	Granite gris G1 d'aspect sain
391.53	$0.19 \cdot 10^{-5}$	1.13	0.036	0.045	Granite rubéfié
402.80	$0.72 \cdot 10^{-6}$	0.88	0.025	0.031	Granite rubéfié
469.20	$0.10 \cdot 10^{-5}$	1.73	0.021	0.026	Granite rubéfié
513.88	$0.26 \cdot 10^{-5}$	0.72	0.053	0.065	Granite rubéfié cataclasé
524.10	$0.11 \cdot 10^{-5}$	0.86	0.032	0.039	Granite rubéfié
535.29	$0.74 \cdot 10^{-6}$	0.56	0.032	0.040	Granite rubéfié
617.18	$0.13 \cdot 10^{-5}$	1.07	0.031	0.038	Granite rubéfié
643.73	$0.37 \cdot 10^{-6}$	1.42	0.014	0.018	Granite rubéfié cataclasé
699.12	$0.13 \cdot 10^{-6}$	0.28	0.019	0.023	<u>Mylonite de couleur sombre</u>
730.30	$0.37 \cdot 10^{-6}$	1.20	0.016	0.019	Granite rubéfié
758.73	$0.47 \cdot 10^{-6}$	2.65	0.012	0.014	G.rubéfié, fissure avec vacuoles
784.20	$2.18 \cdot 10^{-6}$	1.57	0.033	0.041	Granite rubéfié
854.63	$0.23 \cdot 10^{-5}$	0.66	0.052	0.064	<u>Mylonite rouge</u>
866.00	$0.15 \cdot 10^{-5}$	0.57	0.046	0.056	Granite gris G2 d'aspect sain
969.66	$0.21 \cdot 10^{-5}$	0.63	0.051	0.063	Amas de biotite
976.60	$0.57 \cdot 10^{-6}$	0.55	0.029	0.035	<u>Mylonite rouge</u>

Tableau 6.4 : Calcul des rayons d'accès des pores de quelques échantillons du granite d'Auriat, en fonction de la porosité totale n et de la perméabilité intrinsèque k.

r : rayon moyen d'accès aux pores calculée à partir du modèle "tubes".

e : épaisseur moyenne des fissures calculée à partir du modèle "feuillets".

Profondeur (m)	r (μ m)	ASPECT DE LA ROCHE
34.20	0.015	Roche pourrie rubéfiée, alt.météo
153.35	0.055	Granite rubéfié
220.80	0.010	Granite rubéfié
237.30	0.022	Granite gris à l'aspect sain (G1)
966.40	0.052	Granite gris à l'aspect sain (G2)
981.60	0.014	Granite rubéfié

Tableau 6.5 : Rayons moyens d'accès des pores de quelques échantillons du granite d'Auriat, déterminés à partir des spectres porosimétriques.

6.4. - Conclusion du chapitre 6 :

La mesure des coefficients de perméabilité a posé de nombreux problèmes expérimentaux. Il n'a pas été possible de mesurer des perméabilités à l'eau dans la mesure où les débits sortants ne sont pas mesurables dans des délais raisonnables. Nous avons donc injecté de l'azote à 2 et 3 MPa.

Les résultats ainsi obtenus diffèrent de ceux mesurés *in situ*, par choc hydraulique ou par slug-test, d'un facteur variant de 1 à 1000.

Les modèles permettant d'exprimer la surface spécifique en fonction de la porosité totale et de la perméabilité intrinsèque, donnent des résultats comparables, voire identiques, à ceux obtenus par le B.R.G.M avec un appareillage B.E.T. A partir des valeurs de la porosité globale (déterminée à partir de courbes de séchage) et de la perméabilité au gaz (azote), nous montrons qu'il est possible, à moindre coût et dans des délais brefs, de fixer précisément l'ordre de grandeur de la surface spécifique d'un matériau très peu poreux et très peu perméable, ainsi que le rayon moyen d'accès des pores.

Nous avons pu montrer que le granite rubéfié était moins perméable que le granite sain tout en développant une surface spécifique supérieure.

Parallèlement, le rayon d'accès des pores ou l'épaisseur moyenne de la microfissuration, suivant le modèle considéré, est plus faible dans le cas des granites rubéfiés que celui ou celle du granite gris à l'aspect sain. L'explication de ce phénomène se trouve sur les clichés de MEB (cf.chap.2) qui montrent un espace poreux "propre" dans le cas du granite sain et largement tapissé de particules argileuses (parfois jusqu'au colmatage) dans le cas des granites rubéfiés.

Dans le cadre du stockage profond de déchets nucléaires, cette dernière partie de notre travail confirme que le granite rubéfié dépasse souvent en qualité le granite gris à l'aspect sain :

- faible perméabilité ;
- existence d'une microporosité avec présence de particules argileuses ;
- surface spécifique relativement importante.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'étude géologique effectuée dans le cadre du rapport CEA/IPSN/CSDR N°81/03 cité en p 12 n'avait pas considéré la variation de couleur des feldspaths et plus particulièrement des plagioclases qui passaient du blanc gris au brun rouge avec de nombreuses teintes intermédiaires. Ce changement affectant la matrice rocheuse saine ou parfois fracturée, avait semblé un phénomène pouvant avoir une signification importante en terme d'altérabilité des feldspaths. C'est la raison pour laquelle le CEA nous a confié une étude complémentaire approfondie de ce phénomène.

L'échantillonnage a concerné 1000 m de carottes dont le diamètre varie de 7.6 cm à 14.6 cm, nous avons prélevé le granite avec parcimonie. Cette contrainte inhérente à l'étude d'un sondage, nous a amené à adapter les différents essais classiques à l'étude de petites quantités d'échantillon. De plus, les caractéristiques intrinsèques extrêmes du granite d'Auriat ont compliqué notre approche quantitative du granite. Nous avons donc développé une méthodologie spécifique à ce type de problème, dont les étapes principales sont les suivantes :

A - Etude à l'oeil nu du sondage suivi d'un échantillonnage dont les critères peuvent être variables : données bibliographiques ou autres.

B - Etude pétrologique au microscope optique et au MEB :

- Confection d'une lame mince : 25 cm³ environ/échantillon.
- Observation au MEB : 5 cm³ environ/échantillon.

C - Préparation des échantillons :

- Carottage de 2 éprouvettes (si possible) de diamètre $\phi = 20$ mm et de hauteur H = 40 mm : 25 cm³ environ/échantillon.
- Confection de poudre : 50 g (si possible) par échantillon.
- En vue des essais de microdureté Vickers, confection d'une surface polie : 25 cm³ environ/échantillon.
- En vue des analyses chimiques à la microsonde, confection d'une surface polie de diamètre $\phi = 2$ cm et d'épaisseur 2 mm soit 0.2 cm³/échantillon.

D - Analyse des poudres :

- Confection d'une lame de poudre pour analyse par diffraction de rayon X : 5g/échantillon.
- Confection de trois lames orientées pour l'analyse des argiles par diffractométrie de rayons X : 10 g/échantillon.
- Analyses du sodium et du magnésium par spectrophotométrie de flamme : 0.5 g/échantillon.
- Analyse des éléments majeurs par fluorescence X : 1.5 g/échantillon.

E - Traitement des éprouvettes :

1ère éprouvette :

- Mesure de la porosité totale à l'eau (en utilisant la technique des courbes de séchage).
- Mesure des vitesses de propagation des ondes longitudinales (L) et transversales (T) dans les éprouvettes sèches et saturées (pour les ondes L seulement) : détermination des paramètres mécaniques élastiques dynamiques et décomposition de la porosité totale en porosité de pores et en porosité de fissures.
- Mesure de la perméabilité au gaz avec la cellule "HASSLER". Calcul des surfaces spécifiques de fissures, de pores et moyennes.
- Détermination du spectre porosimétrique au mercure - destruction de la 1ère éprouvette.

2ème éprouvette :

- Mesure de la résistance à la compression Rc - destruction de la 2ème éprouvette.

Remarque :

Pour chaque échantillon, le décompte exacte des quantités de granite nécessaires à ce programme d'essais est de 105.2 cm³ (281 g). Par sécurité, on a doublé ce volume en l'amenant à 200 cm³ environ. D'un point de vue pratique cela a correspondu au prélèvement d'échantillons dont les dimensions ont été :

- de 0 à 544.20 m : carottes de 4 cm de longueur et de diamètre 8 cm
- de 544.20 à 1003.15 m : demi-carottes de 9 cm de longueur et de diamètre 7.6 cm (diamètre originel du sondage).

F - Traitement des données :

La nécessité de traiter rapidement un grand nombre de données expérimentales (stockage, calculs et sorties graphiques) nous a amené à mettre au point un logiciel convivial intégrant les différents aspects de notre étude. Ce logiciel peut être implanté facilement sur n'importe quel micro-ordinateur AT fonctionnant sous MS-DOS.

La première partie de l'étude a permis de définir un certain nombre de faciès dont la représentativité a été confirmée lors de l'étude systématique de l'espace poreux :

- Granite gris à l'aspect sain
- Granite rubéfié ($n < 2 \%$)
- Granite rubéfié ($n > 2 \%$)
- Granite rubéfié ayant subi une reprise par l'altération météorique (arénisation plus ou moins avancée)
- Granite cataclaté et mylonites

Les deux derniers faciès sont quantitativement anecdotiques.

Les analyses chimiques globales de la roche ne permettent pas à elles-seules de différencier les faciès. A l'échelle du minéral, les analyses à la microsonde ont montré que les plagioclases rubéfiés sont légèrement plus pauvres en Calcium et plus riches en fer que les plagioclases sains.

Les résultats de microdureté Vickers témoignent du fait que les zones très rubéfiées des feldspaths sont mécaniquement moins performantes que les zones saines. Nous avons constaté que ce type d'altération se développait indifféremment à partir de la périphérie ou du coeur du minéral. Cependant, les caractéristiques mécaniques du granite rubéfié sont correctes alors que celles du granite sain sont légèrement supérieures celles de la moyenne des granites.

L'étude du milieu poreux justifie et confirme notre classification.

Il existe une relation entre les valeurs de porosité totale à l'eau et l'état d'altération de la roche. Les porosités les plus faibles ont été mesurées sur le granite sain (n est de l'ordre de 1 %) et surtout sur les mylonites. Le granite rubéfié possède une porosité généralement inférieure à 2 %.

La décomposition en porosité de pores et de fissures témoigne d'un colmatage important de la fissuration du granite rubéfié. Les indices de qualité sec les plus mauvais sont rencontrés dans le granite sain à cause de sa microfissuration ouverte. Les clichés de MEB confirment ce résultat, particulièrement au niveau des plagioclases : les surfaces sont parfaitement propres dans le cas des plagioclases sains alors que les pores des plagioclases rubéfiés contiennent des particules argileuses (du type illite).

La porosimétrie au mercure montre l'existence d'une classe de microporosité (0.001-0.01 μm) importante dans le faciès rubéfié. L'existence de cette classe n'est malheureusement pas décelable au MEB. Si l'on admet que des particules argileuses occupent une partie de la microporosité, celles-ci pourraient éventuellement fixer certains radionucléides dans le cas de la destruction des barrières artificielles. Il reste à définir exactement la nature de ces particules argileuses ainsi que leur capacité de sorption.

Nous avons mis au point des corrections indispensables pour l'étude porosimétrique des matériaux très peu poreux. Elles autorisent maintenant des interprétations correctes des mesures, même pour des porosités de l'ordre de 0.1 %. Un plus grand nombre d'essais de ce type serait nécessaire pour mieux caractériser la distribution des rayons d'accès des pores du granite d'Auriat. Le manque de temps ne nous a pas permis d'avancer plus avant dans cette voie. Moyennant quelques modifications de l'appareillage de mesure, nous pensons qu'il serait possible d'affiner cette technique pour permettre l'étude de matériaux dont la porosité globale serait infime.

Le non colmatage de la microfissuration du granite sain se matérialise par une perméabilité légèrement plus forte que dans le cas du granite rubéfié. Ce paramètre est prépondérant dans l'optique d'une migration des radionucléides vers la biosphère. En combinant les porosité et perméabilité relatives à chaque échantillon, le calcul permet de montrer que les surfaces spécifiques les plus importantes sont le fait des granites rubéfiés.

La synthèse de notre étude permet de dire que le granite rubéfié est probablement aussi favorable, sinon plus, que le granite sain dans le cadre d'un stockage profond de déchets nucléaires de haute activité en formation granitique pour les raisons suivantes :

- 1 - faible porosité : de 0 à 2 %
- 2 - bon indice de qualité témoignant du colmatage de la fissuration
- 3 - existence d'une microporosité pouvant jouer le rôle de piège à radionucléides
- 4 - surface spécifique relativement importante
- 5 - perméabilité très faible retardant la migration des radionucléides
- 6 - paramètres géotechniques autorisant un percement de puits et de galeries sans difficultés majeures

Le granite rubéfié entre dans la catégorie des roches altérées. A ce titre, il fait l'objet d'un préjugé défavorable dans l'optique du stockage en profondeur de déchets radioactifs de haute activité. Nous pensons au contraire qu'il possède des qualités qui font de lui un sérieux concurrent du granite sain. Le processus de rubéfaction n'entraîne pas la ruine de la roche mais au contraire une amélioration de ses caractéristiques. D'autres études seraient cependant nécessaires pour confirmer son aptitude de roche-hôte. En effet, de nombreuses questions restent posées :

- Quels sont les processus générateurs de ce type d'altération ?
- Quel sera le comportement du granite rubéfié vis à vis de la chaleur dégagée par les colis radioactifs ? Quelles seront les modifications apportées aux caractéristiques du milieu poreux, particulièrement au niveau de la perméabilité ? Quels seront les effets d'une exposition à l'atmosphère pendant la phase d'exploitation d'un stockage profond (soit 30 ans approximativement).
- Quelles seraient les modifications pétrophysiques qu'entraîneraient une venue de fluides agressifs, notamment au niveau du volume poreux (processus de dissolution/reprécipitation) ?
- La capacité du granite rubéfié à s'altérer sera-t-elle supérieure à celle du granite sain face aux types d'agressions envisageable ?
- Enfin, il serait intéressant, dans un but comparatif de répertorier et d'étudier les massifs granitiques ayant subi le même type d'altération que le granite d'Auriat.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR - NORMES FRANCAISES

NF P 18-554 décembre 1979 - Essai de porosité à l'eau (bétons)

ALEXANDROV K.S., BELIKOV B.P., RYZOVA T.V. (1966)

Calcul des constantes élastiques des roches d'après leur composition minéralogique.

Traduction 67T90 du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Vycslenic uprugih parametrov gornyh porod po mineral'nomu sostavu.

Izv.Akad.Nauk SSR. Serija Geologiceskaja. URSS, N°2.

AMAGAT E.H. (1880)

Sur la déformation des tubes de verre sous de fortes pressions.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris, Vol.90 , pp.863-864

AMAGAT E.H. (1889)

Compressibilité du mercure et élasticité du verre.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris, Vol. 108, pp.228-231.

AMAGAT E.H. (1889)

Détermination directe (c'est à dire sans faire usage d'aucune formule) de la compressibilité du verre du cristal et des métaux, jusqu'à 2000 atm.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris, Vol. 108, pp.727-730.

AMAURY, DESCAMPS (1869)

Sur la compressibilité des liquides.

Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris, Vol.68 , pp.1564-1565

ARNOULD M., AUDIGUIER M., DELAGE P., PELLERIN F.M., STRUILLLOU R., VAYSSADE B. (1980)

Etude des sols argileux par la porosimétrie au mercure. Contrôle des variations de texture sous diverses conditions.

Bulletin de l'IAEG, N°22, pp.213-223

ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED (1980)

A disposal centre for immobilized nuclear waste. Conceptual design study.

Doc.AECL-6416, 127 p.

AUBOIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.P. (1975)

Précis de Géologie. 1 - Pétrologie

Dunod, Paris. 717 p.

AUDIGUIER M., PELLERIN F.M. (1979)

Recueil des modes opératoires des essais d'identification les plus courants en géologie de l'Ingénieur.

Rapport interne, Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole des Mines de Paris.

- AUTRAN A. (1980)
la zone interne de l'orogénèse varisque en France de l'Ouest,
excursion extraordinaire de La Soc.Géol. de France (Mai
1979).Bull.Soc.Geol.Fr.,7 ,21.
- BERGUES J., CHARPENTIER J.P., HABIB P. (1984)
Influence de la fissuration sur le comportement mécanique du granite.
Journées sur le granite, Orléans la Source, Doc.BRGM N°84, pp.203-212
- BOUSQUIE P., PELLERIN F.M., STRUILLLOU R., ARNOULD M. (1980)
Contribution de la porosimétrie à l'étude de quelques propriétés de
roches carbonatées poreuses.
Bulletin de l'IAEG, N°22, pp.225-232
- BRACE W.F. (1965)
Some new measurements of linear compressibility of rocks.
Journal of geophysical research, January 15, 1965, pp.391-398
- BRIDGMAN P.W. (1925)
The compressibility of several artificial and natural glasses.
American Journal of Science, Vol.10, p.359-367
- BRIDGMAN P.W. (1949)
The physics of high pressure
G.Bell & Sons, London, 445 p.
- BÜCKLE H. (1960)
L'essai de microdureté et ses applications
Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, 274 p.
- CARNAZZI P. (1903)
Influenza della pressione e della temperatura sul coefficiente di
compressibilità del mercurio.
Nuev.Cim., Vol.5, pp.180-189
- CSDR 81-03 (1981)
Investigation par forages profonds du granite d'Auriat.
Rapport du BRGM pour le CEA (IPSN).
- CSDR 83-15 (1983)
Etude du comportement du granite sous l'effet de la pression (jusqu'à
la rupture) et à température élevée (jusqu'à 200°).
Rapport LMS pour le CEA (IPSN)
- CHENG C.H. (1981)
Dynamic and static moduli.
Geophysical Research Letters, Vol.8, N°1, pp.39-42
- DELON J.F., DELLYES R. (1967)
Calcul du spectre de porosité des minéraux phylliteux.
C.R.Acad.Sc.Paris, t.265, pp.1661-1664
- DELON J.F. (1970)
Contribution à l'étude de la surface spécifique et de la microporosité
des minéraux et des roches.
Thèse Doct.ès Sci., Nancy, 187 p.

- DIAZ PEÑA M., McGLASHMAN M.L. (1959)
An apparatus for the measurement of the isothermal compressibility of liquids. The compressibility of mercury, of carbon tetra-chloride, and of water.
Trans.Farad.Soc., Vol.55, Pt.12, pp.2018-2024
- DOLEZALEK, SPEIDEL (1920)
ZS. physik.Chem., Vol.94. p.72
- DURAND G. (1978)
Microfissuration des roches.
Thèse de Doct.3^e cycle, Paris VI, 81 p.
- EBERHART J.P. (1976)
Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux solides.
Doin, Paris, 507 p.
- FREVEL L.K., KRESSLEY L.J. (1963)
Modifications in mercury porosity.
Analytical Chemistry, Vol.35, N°10
- GEBAUER D., BERNARD-GRIFFITHS J., GRUNENFELDER (1981)
U/Pb zircon et monazite datin g of a mafic-ultramafic complex and its country rocks.
Contr.Min.Petr.. N°76. pp. 292-300
- GIBSON R.E., LOEFFLER O.H. (1941)
J.Amer.Chem.Soc., Vol.63, p 898
- GONI I., RAGOT J.P., SIMA A. (1968)
Méthode d'études du champ microfissural des minéraux et des roches et possibilités d'application en géologie.
Bulletin du B.R.G.M (2ème série).section II, n°4, pp.51-92
- GUILLOT D. (1982)
Propriétés physiques et texturales d'un modèle artificiel de matériau à porosité intergranulaire.
Thèse Doc.Ing."Géol. de l'Ing.". Paris VI & ENSMP, 103 p.
- GRASSI (1851)
Recherches sur la compressibilité des liquides.
Ann.Chim.Phys., Vol.31, pp.437-478
- HAMON P., MORLIER P. (1969)
Quelques propriétés relatives aux célérités des ondes élastiques dans les solides poreux saturés.
Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol.24, N°7-8, pp 879-892
- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS (1969)
WEAST R.C. ed., 49th edition.
- HILL G. (1960)
Etude de la répartition des pores suivant leur dimension dans les pâtes cuites.
Trans.of Brit.Ceramic.Soc., Vol.59, N°6

- HOUPERT R. (1969)
L'effet d'échelle en compression simple dans le cas des granites.
C.R.Acad.Sc.Paris, t.269, pp.1171-1174
- JOUENNE C.A. (1975)
Traité de céramiques et matériaux minéraux.
Ed.Septima, Paris, 657 p
- KING M.S. (1983)
Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield.
Int.J.Rocks Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.Vol.20, N°5, pp.237-241
- KLIMIS N. (1989)
Atténuation des ondes ultrasonores dans les roches.
Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Vol.161, pp.7-16
- LANDAU L., LIFCHITZ E. (1967)
Théorie de l'élasticité
Mir, Moscou, 206 p.
- LAVIE J.M (1982)
La gestion industrielle à long terme des déchets radioactifs en France.
Ed.O.Lesourd. Extrait du guide international de l'énergie nucléaire. 10 p.
- LE BERRE P. (1975)
Recherche d'une méthodologie de prospection de gisements de granulats naturels routiers à hautes performances. Application au Massif Armoricaïn.
Thèse Doct.3^e cycle "Géol.de l'Ing.", Paris VI, 327 p.
- LECA D. (1986)
Optimisation de la diffractométrie de rayons X et de la microscopie optique en vue de l'étude fine de l'altération des granites.
Mémoire D.E.A, Ecole des Mines de Paris, ENPC, Bordeaux I, Paris VI
- LEROY J., SONET J. (1976)
Contribution à l'étude géochronologique des filons de lamprophyres recoupant le granite à deux micas de Saint-Sylvestre (Massif central français).
C.R.Acad.Sc.Paris, t.283, pp.1477-1480
- MAURY V. (1982)
Le stockage souterrain : conception, réalisation. Application aux énergies conventionnelles, nouvelles, aux déchets et à divers produits.
Annales de l'Inst.Techn. du bât. et des Trav.publics, N°407, sept.1982, série TP 194, pp 82-111.
- MEUNIER A., PARNEIX J.C., BEAUFORT D. (1984)
Les altérations hydrothermales des massifs granitiques.
Journées sur le granite, Orléans la Source, Doc.BRGM N°84, pp.131-141
- MOELWYN-HUGHES E.A. (1951)

Journal physical and colloid chemistry, Vol.55, p 1246

- MOTT B.W. (1956)
Micro-indentation hardness testing.
Butterworths Scientific Publication, London, 272 p.
- MOUNEY H. (1980)
Gestion et évacuation des déchets radioactifs.
Compte rendu de la 1ère conférence des Communautés Européennes.
20-23 mai 1980, Luxembourg, 12 p.
- PARNEIX J.C. (1987)
Mécanisme de l'altération hydrothermale des granites. Implications pour le stockage des déchets radioactifs de haute activité.
Thèse Doct.ès Sci., Paris VI, 199 p.
- PELLERIN F.M. (1980)
La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches.
Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées,
N°106, pp.105-116
- POTIER J.M., ANDRE-JEHAN R. (1990)
Le stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde.
Mém.Soc.Géol.France, N.S, Mem.N°157, pp.239.248
- PURCELL (1949)
Capillary pressures. Their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom.
Journal of Petroleum Technology, fév.1949.
- REGNAULT V. (1847)
Mem.Inst.France, Vol.21, p 329
- RICHARDS T.W., STULL W.N. (1904)

ZS. physik.Chem., Vol.49, p.1
- ROUBAULT M., FABRIES J., TOURET J., WEISBROD A. (1982)
Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant.
Ed.Lamarre-Poinat, 3ème ed, 382 p.
- SCHOLZE H. (1974)
Le Verre. Nature, structure et propriétés.
Institut du Verre, Paris, 387 p.
- SIMMONS G., TODD T., BALDRIDGE W.S. (1975)
Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks.
American Journal of Science, Vol.275, pp.318-345
- SRUILLLOU R. (1965)
Rôle du fer dans l'altération rapide des feldspaths en climat tempéré.
C.R.Acad.Sc.Paris. t. , pp. -
- TAIT P.G. (1881)
The pressure errors of the *Challenger* thermometers : report of the voyage H.M.S *Challenger*.
Narrative 2, Appendix A, p 42

- TAIT P.G. (1889)
Report of some of the physical properties of fresh water and sea water : report of the voyage of H.M.S *Challenger*.
Phys. and Chem., Vol.2, pp.1-76
- TATHAM R.H. (1982)
Vp/Vs and lithology.
Geophysics, Vol.47, N°3, pp.336-344
- TOURENQ C., FOURMAINTRAUX D. (1971)
Contribution de la pétrographie à l'étude des propriétés physiques et mécaniques des roches.
Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, N°50, pp.157-163
- TOURENQ C., FOURMAINTRAUX D., DENIS A. (1970)
Propagation des ondes et discontinuités des roches.
Symp.Int.Mec.Roches, Nancy.
- VOINOVITCH I.A. (1962)
L'Analyse des silicates
Hermann, Paris, 1962, 510 p.
- WALSH J.B. (1965)
The effect of cracks on the compressibility of Rock.
Journal of Geophysical Research, Vol.70, N°2, pp.381-388
- YOUNG R.P., HUTCHINS D.A. (1987)
Measuring anisotropy in rocks using laser-generated ultrasound.
Geophys.J.R.astr.Soc.N°91, pp.501-516

ANNEXES

ANNEXE 1.1
CONVENTION DES COULEURS

VERT		ROSE PALE ORANGE		MARRON CLAIR	
° 3995	° 459	° 1355	° 155	° 125	° 4635
° 448	° 460	° 143	° 156	° 139	° 4645
° 449	° 461	° 148	° 162	° 146	° 4655
° 4495	° 5605	° 149		° 168	° 4665
° 4505	° 5615			° 167	° 4675
° 4515	° 5625	ROSE ORANGE SOUTENU		° 1675	° 4685
° 4525	° 5635	° 1555		° 465	° 470
° 4535	° 5773	° 1565	° 1625	° 468	° 471
° 4545	° 5783	° 1575	° 1635	MARRON FONCE	
° 450	° 5793			° 1395	° 469
° 451	° 5767			° 1615	° 4625
° 452	° 5777	TEINTE CHAIR		° 1685	° 490
° 454	° 584			° 174	° 497
° 456	° 586	° 472	° 1755	° 175	° 4975
° 457	° 5825	° 473	° 479	° 181	° 504
° 458	° 5845	° 474	° 481	° 1815	° 476
	° 5865	° 475	° 482	° 1605	° 477
				° 462	° 478
				° 464	
GRIS		MARRON ROSE		BLEU	° 5487
° 404	° 422	° 4695	° 483		° 5497
° 407	° 423	° 4705	° 491	ARGENTE	877
° 409	° 424	° 4715	° 498	DORE	871
° 413	° 427	° 4725	° 499	NOIR	° Black Process
° 414	° 428				° 419
° 415	° 429	VIOLET CARMIN			
° 416	° 431	° 4985	° 5005		
° 417	° 435	° 4995			
° 418	° 436				
° 420	° 441				
Cool gray 1C		ORANGE		ROUGE	
Cool gray 2C				° 171	° 1805
Cool gray 5C		° 1385	° 1595	° 173	° 195
Cool gray 7C		° 145	° 163	° 180	° 506
Cool gray 8C		° 152	° 164	° 187	
Cool gray 9C		° 157	° 165		
Warm gray 1C		° 159	° 166		
Warm gray 2C					
Warm gray 4C					
Warm gray 10C					

Couleurs définies à partir de 139 échantillons 453 mesures ont été effectuées et 152 nuances ont été observées.

Les références chiffrées correspondent au nuancier PANTONE (papier)

PANTONE Color Formula Guide second printing 1987 - 1988.

Co Pantone, Inc. 1963, 1987.

ANNEXE 1.2

**ETUDE VISUELLE DE L'ALTERATION DU GRANITE D'AURIAT
A PARTIR DU FORAGE 0689/2X/14**

Ø 146.00 mm : 0 m - 61.80 m

- | | | |
|---|-----------------|---|
| 1 | 1.65 - 15.00 m | <p>- Granite largement grenu à phénocristaux très altérés. Roche pourrie. Traces de rouille et d'altération supergène dans les fractures.</p> <p>- Couleur des minéraux :</p> <p>* plagioclases : teinte chair 473, marron rose 4715, 4725, marron clair 465</p> <p>* rouille : orange 1385,152, marron clair 1675.</p> |
| 2 | 15.00 - 16.70 m | Arène de teinte rouille orange 145, marron clair 4665, 4645, 4635, marron foncé 174. |
| 3 | 16.70 - 19.80 m | Zone broyée : nombreuses fractures de pendage 60° avec remplissage argileux vert 5783 et traces de rouille. Phénocristaux de teinte rose pâle orangé 155, 156. |
| 4 | 19.80 - 22.30 m | <p>Même type de roche.</p> <p>a) 19.80 - 21.00 m : fracturation peu intense</p> <p>b) 21.00 - 21.40 m : fracturation subverticale avec remplissage argileux de teinte verte 452.</p> <p>c) 21.40 - 22.30 m : bloc de granite délimité, vers le bas, par une fracture subverticale comprenant des stries horizontales. Roche bicolore : phénocristaux rose pâle orangé 155 et Quartz gris (plus les biotites).</p> |
| 5 | 22.30 - 24.80 m | <p>De 23.50 m à 24.20 m zone broyée. Arène de fracture subverticale de couleur verte 452.</p> <p>Réapparition progressive des minéraux de teinte marron rose 4715, 4725, visiblement très altérés.</p> |
| 6 | 24.80 - 30.00 m | <p>Même type de granite qu'en 1 .</p> <p>a) 25.30 - 25.80 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert et traces de rouille.</p> <p>b) 26.50 - 27.00 m : faille subverticale à remplissage vert délimitant deux zones.</p> <p>* 25.80 - 27.00 m : granite du type 1 avec phénocristaux rose orangé soutenu 1555 et plagioclases marron clair 4645.</p> <p>* 27.00 - 27.60 m : granite bicolore du type 4 c) mais sans biotites visibles. Vers 27.20 m, zone broyée.</p> <p>c) 27.60 - 30.00 m : même type de granite qu'entre 25.80 - 27.00 m. Fracture verticale tout au long avec remplissage argileux vert et traces de rouille. Nombreuses fractures de pendage, 60° ou subhorizontale, le remplissage argileux étant plus important dans celles à 60°. Présence par endroit d'amas centimétriques de biotite.</p> |
| 7 | 30.00 - 30.35 m | Zone broyée. Important remplissage de produit argileux gris vert 413, 415 et rouille 1395. |

- | | | |
|----|-----------------|--|
| 8 | 30.35 - 32.20 m | Même type de granite qu'en 1. Intense fracturation de pendage 60°. Tous les 15 à 20 cm avec remplissage argileux de teinte verte. |
| 9 | 32.20 - 33.45 m | Roche à l'aspect relativement sain. Fond plus finement grenu et de teinte plus grise. Les phénocristaux de feldspaths alcalins sont blancs. Plagioclases rose orangé soutenu et marron rose assez abondants. Zone peu fracturée. |
| 10 | 33.45 - 34.90 m | Augmentation de la concentration des phénocristaux blancs, particulièrement vers 34.75 m. Ces cumulats sont accompagnés d'amas pluricentimétriques de biotites. Quelques fractures horizontales avec remplissage peu abondant de teinte rouille. |
| 11 | 34.90 - 37.25 m | <ul style="list-style-type: none"> * 34.90 - 35.65 m : granite du type 1. Fracturation horizontale tous les 10 cm. Fractures de pendage 60° à 35.25 m, 35.40 m, 35.65 m, 36.60 m. * 35.65 - 36.60 m : zone très fracturée. les phénocristaux prennent une teinte rose. Très peu de biotites mais présence de minéraux verts. Remplissage argileux vert des fractures, avec traces de rouille. * 36.60 - 37.25 m : granite du type 1. Vers 37.25 m, 20 cm de granite du type 10. |
| 12 | 37.25 - 37.80 m | Granite du type 1 à l'aspect délavé. Zone intensément affectée par des fractures de pendage 60°. Traces de rouille au niveau des fractures. |
| 13 | 37.80 - 39.25 m | <ul style="list-style-type: none"> * 37.80 - 38.10 m : granite du type 9 * 38.10 - 38.80 m : granite du type 10. Cumulats de phénocristaux blancs et biotites. * 38.80 - 39.25 m : granite du type 9 avec une texture plus grenue. |
| 14 | 39.25 - 45.20 m | Granite du type 9 avec une texture plus grenue. Granite du type 10 par endroit. Petits plagioclases de couleur marron rose à orange 163 dans les zones riches en phénocristaux blancs. Fracturation de pendage 60° avec traces de rouille. |
| 15 | 45.20 - 48.00 m | Zone très fracturée. Fracture verticale tout le long de cet intervalle avec remplissage blanc, vert et rouille. Nombreux amas de phénocristaux blancs et de biotite (granite du type 10). |
| 16 | 48.00 - 61.80 m | Granite du type 1 à phénocristaux de Feldspaths alcalins blancs. Les plagioclases sont souvent de teinte chair 479 à marron foncé 478, et entourés d'un liséré blanc. Fissuration subverticale avec remplissage argileux de couleur verte et traces de rouille omniprésentes jusqu'à 56.60 m. |

122.60 mm : 61.80 m - 251.95 m

- 17 61.80 - 73.00 m Granite du type 1. Prédominance de la fracturation horizontale avec colmatage par un produit blanc pouvant présenter des traces rouille. Les plagioclases sont de teinte rose pâle orangé à orange et marron foncé.
Vers 66.00 m fracturation horizontale tous les 2 à 10 cm. Prédominance des minéraux verts sur les plagioclases rose pâle orangé, orange et marron foncé.
67.00 - 73.00 m : prédominance des plagioclases orange par rapport aux plagioclases rose pâle orangé et marron foncé.
70.10 - 70.25 m : granite à texture plus fine et contenant des cumulats centimétriques de biotites.
- 18 73.00 - 79.00 m Zone où alternent granite microgrenu et granite largement grenu.
a) 73.00 - 73.30 m : granite gris microgrenu. Plagioclases marron clair 125. Forte concentration de phénocristaux de feldspaths alcalins blancs orientés à 10°.
b) 73.30 - 74.09 m : granite gris microgrenu. Absence de phénocristaux. Lits de biotites orientées à 60°. Fracturation subhorizontale.
c) 74.09 - 74.38 m : granite grenu avec phénocristaux grossièrement orientés à 60°. Plagioclases marron rose.
d) 74.38 - 75.63 m : granite microgrenu. Tous les minéraux sont orientés à 60°. Phénocristaux peu nombreux.
Les plagioclases marron clair 125 sont minoritaires par rapport aux plagioclases marron foncé 477. Prédominance des fractures horizontales avec présence de minéraux verts à leur abord.
e) 75.63 - 77.30 m : alternance de granite microgrenu gris riche en biotite et en quartz, et de granite plus grenu. Orientation de 30° des minéraux. Les phénocristaux de feldspath alcalin blancs sont plus automorphes dans les passages de granite microgrenu sombre.
77.30 - 79.00 m : granite largement grenu avec quelques passes microgrenues à 77.66, 77.77, 78.00 et 78.95 m. Celles-ci présentent des accumulations de biotites surmontées d'une "contamination" des plagioclases marron foncé 477, vers le haut, sur quelques centimètres à 40 cm au maximum et 20 cm en moyenne.
78.23 - 78.37 m : fracture de 60° avec remplissage vert de 1 mm d'épaisseur.
- 19 79.00 - 81.15 m Granite grenu. Phénocristaux blancs non orientés. Nombreux minéraux marron foncé.
79.65 - 79.94 m : fracture subverticale.
81.50 m : fracture de pendage 60° à remplissage argileux vert.

- 81.15 m : fracture horizontale avec produit de colmatage blanc ne faisant pas effervescence avec HCl.
- 20 81.15 - 85.20 m Alternance de granite largement grenu et de granite gris à forte concentration de biotite. Les phénocristaux de feldspath alcalin sont blancs et non orientés. Prédominance des plagioclases oranges sur les plagioclases rubéfiés marron foncé. 82.50 - 82.58 m : enclave de biotites, pendage 60°.
- 21 85.20 - 87.40 m Zone très peu rubéfiée. Abondance de plagioclases blanc mat avec le centre éventuellement rose orangé soutenu. 96.92 - 87.40 m : fracture subverticale avec remplissage de 1 mm d'épaisseur de produit argileux verdâtre. Peu de fracturation sur cet intervalle. Aspect général blanchâtre de la roche dû à l'abondance des plagioclases blanc mat.
- 22 87.40 - 92.40 m Zone largement grenue avec prédominance des phénocristaux blancs. Dans le cas où ceux-ci constituent l'essentiel de la roche, on note la présence d'amas centimétriques de biotites. 90.20 - 90.30 m : traînées subverticales de biotites accompagnées vers le haut de minéraux teinte chair en grand nombre sur 5 cm, puis plus clairsemés sur 20 cm. 92.40 m : grosse accumulation de biotites suivant un pendage de 60° à subvertical. Des phénocristaux d'orthose soulignent le mouvement.
- 23 92.40 - 100.85 m a) 92.40 - 95.10 m : granite largement grenu, très clair et très peu rubéfié. Les petits plagioclases blanc mat dominant en nombre ceux dont le centre est de teinte rose pâle orangé 156. b) 95.10 - 95.35 m : secteur très riche en biotites le long d'une fracture subverticale s'enfonçant jusqu'à 96.00 m. c) 95.35 - 96.80 m : zone très blanche. Les contours des minéraux sont flous. Prédominance des grands feldspaths blanc pâle non automorphes. Minéraux orange clairsemés, aux contours flous. d) 96.80 - 98.20 m : granite grenu avec peu de plagioclases orange ou rose pâle orangé. Les minéraux ont de nouveau des contours nets. e) 98.20 - 100.85 m : alternance de granite 23 a, 23 d, et cumulats de biotites
- 24 100.85 - 103.45 m Granite du type 23 c, avec des amas de biotites remplissant les fissures verticales. 102.00 - 102.50 m : granite gris très peu rubéfié contenant des phénocristaux grossièrement orientés selon l'axe vertical. Quelques plagioclases blanc mat et rose pâle orangé/teinte chair. 102.50 - 103.45 m : - LACUNE -
- 25 103.45 - 139.40 m Zone homogène.

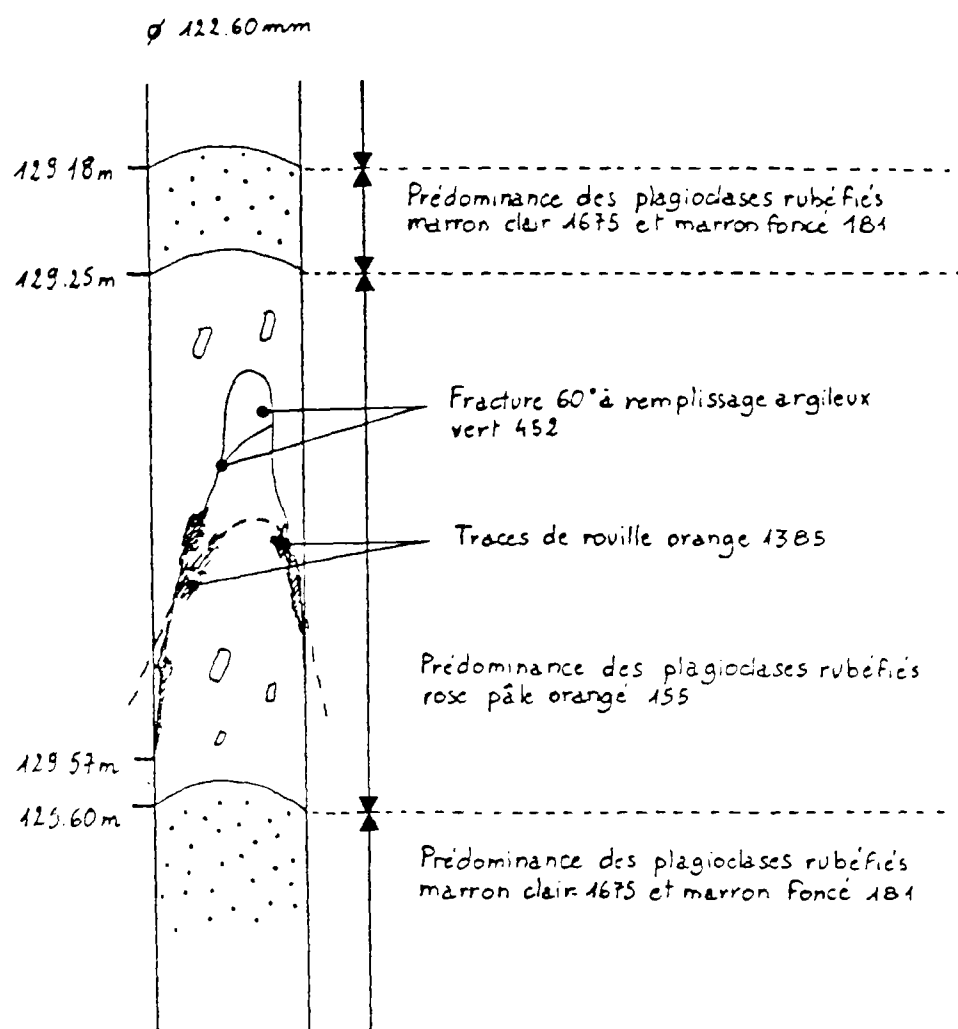


FIG.1

Granite largement grenu et moyennement rubéfié à phénocristaux de feldspath alcalin blancs pluricentimétriques.

Fractures subverticales : 105.60 - 106.05 m, 107.45 - 107.70 m : remplissage argileux vert, et traces de rouille

110.65 - 114.50 m : remplissage de Quartz.

Fractures 60° : 111.50 - 11.70 m, 111.84 - 111.93 m.

Epaisseur du remplissage de couleur rouille : 3 mm

113.32 - 113.69 m : enclave à biotite vers le bas.

114.80 - 115.00 m, 115.08 - 115.18 m, 115.23 - 115.32 m, remplissage argileux vert et traces de rouille.

115.77 - 115.94 m : remplissage couleur rouille.

fig.1 : fracture de pendage 60° avec remplissage couleur rouille 1385 d'épaisseur centimétrique par endroits. On note une roséification des plagioclases l'avoisinant. On retrouve ce même type de fracture à 131.44 m et 131.82 m.

De manière générale, on note qu'à proximité des nombreuses fractures subverticales à remplissage vert, avec éventuellement traces de rouille, on trouve sur 1 cm d'épaisseur des plagioclases rose pâle orangé ou teinte chair, les plagioclases marron foncé ou marron rosé n'apparaissent qu'au-delà de cette limite de 1 cm.

26 139.40 - 158.00 m Intervalle où le granite est largement grenu, mais beaucoup plus fracturé que 25. On rencontre des secteurs où les phénocristaux sont également rubéfiés.

a) 139.40 - 141.55 m : zone intensément fracturée subverticalement, horizontalement et à 60°. On note la présence de produits argileux de remplissage verts. Les phénocristaux sont relativement petits et rubéfiés rose pâle orangé. Peu de plagioclases marron et traces d'oxydation autour des biotites.

b) 141.55 - 144.00 m : roche à phénocristaux beaucoup plus grands qu'en 26 a. Nombreux plagioclases marron répartis de façon homogène.

c) 144.00 - 145.00 m : séquence d'altération centrée sur une fracture de pendage 60°.

(cf. Fig.2)

145.00 - 146.00 m : - LACUNE -

d) 146.00 - 147.30 m : 146.00 - 146.40 m subverticale avec faible remplissage argileux vert et traces de rouille. Mêmes séquences d'altération qu'en 26 c.

e) 147.30 m : forte concentration de biotite et plagioclases marron autour d'une fracture 60°.

f) 147.40 - 152.77 m : granite à phénocristaux rubéfiés rose pâle

orangé à rose orangé soutenu.

Réseau de fissures verticales colmatées au remplissage couleur rouille. 150.00 : fracture 60° à remplissage argileux vert avec minéraux verts

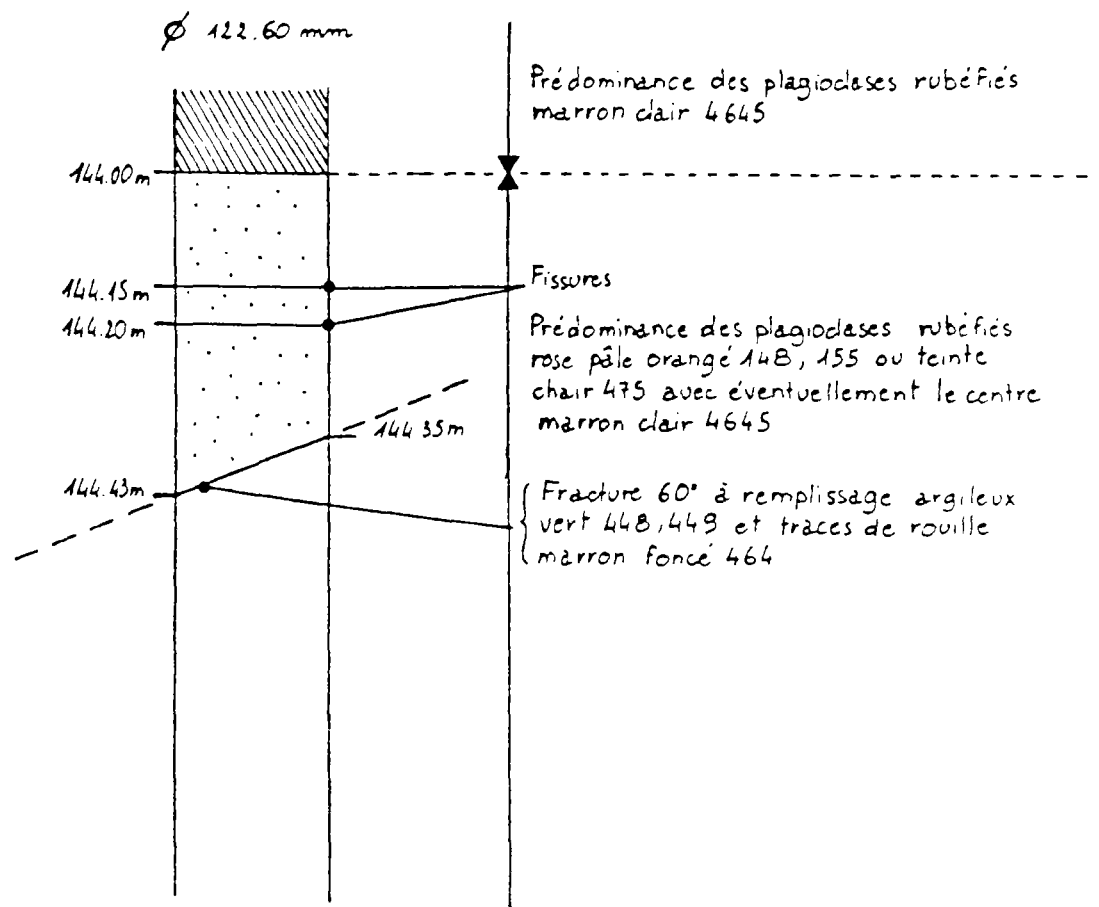


FIG.2

au voisinage. De ce fait il reste très peu de plagioclases non altérés rose orangé.

152.67 - 152.73 m : enclave sombre

g) 152.7 - 158.00 m : granite du type 26 b, intensément fracturé (subverticalement et à 60°).

On retrouve des figures d'altération comparables à celle décrite en 25, fig.1 ; exemple : 153.42 - 153.70 m.

- 27 158.00 - 159.30 m Granite grenu à phénocristaux blancs. Les plagioclases marron foncé sont majoritaires en nombre par rapport aux plagioclases oranges quasi inexistants. plagioclases rose orangé pâle ou teinte chair aux abords des fractures subverticales à remplissage argileux vert et à traces rouille.
- 28 159.30 - 164.00 m Granite microgrenu gris très fracturé et de manière complexe. plagioclases marron rose 498, et teinte chair 472 quand ils sont près des fractures.
Fractures 60° à remplissage argileux verdâtre et traces de rouille.
- 29 164.00 - 167.40 m Granite grenu du type 27 avec de gros phénocristaux aux contours nets. Fracture verticale à remplissage rouille de 166.50 - 167.40 m.
- 30 167.40 - 168.20 m Granite microgrenu avec quelques phénocristaux
167.50 - 167.70 m : fissure subverticale entourée de plagioclases rose pâle, teinte chair sur une épaisseur inférieure à 1 cm. Dans les zones les plus grises, prédominance des plagioclases rubéfiés marron foncé.
- 31 168.20 - 168.60 m 168.20 - 168.30 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert.
Jusqu'à 168.48 m, texture grenue floue, sans phénocristaux. Enclave de biotite avec présence de plagioclases rose orangé soutenu.
Réapparition de plagioclases marron foncé en nombre à partir de 168.48 m.
- 32 168.60 - 171.00 m Granite grenu du type 27.
cf.fig.3 système de fracturation.
cf.fig.4 recoupement d'un filon gris à biotites orientées par une fissure avec présence de plagioclases rubéfiés.
170.73 - 170.95 m : fracture 60° avec remplissage de couleur rouille. Concentration de plagioclases rubéfiés marron foncé. Ceux-ci sont souvent plus clairs au centre mais également à la périphérie.
- 33 171.00 - 179.00 m Granite grenu du type 27. Plagioclases violet carmin 4985 et rose orangé soutenu 1625.
Nombreuses fractures 60° avec traces de rouille.
- 34 179.00 - 182.00 m Granite grenu clair très fracturé.

Ø 122.60 mm

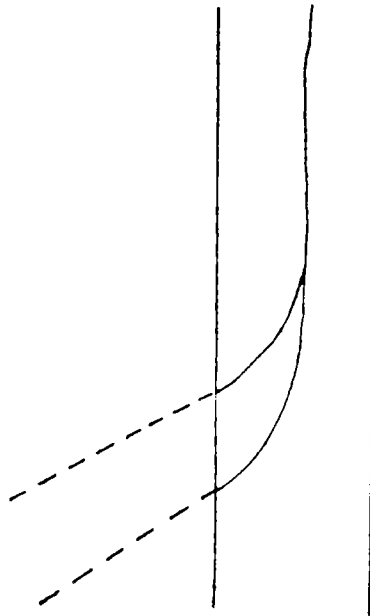


FIG.3

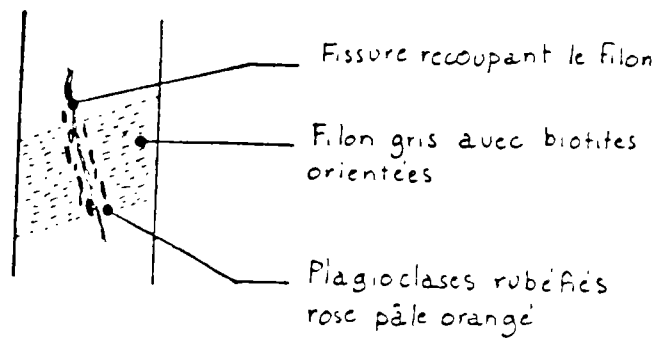


FIG.4

Fractures : 181.00 - 181.20 m ; 181.20 - 181.40 m.

Remplissage argileux vert rouille. Nombreuses fissures colmatées subverticales.

Les phénocristaux de feldspath potassique sont blancs au centre et ont une périphérie teinte chair.

Forte concentration de plagioclases rose pâle orangé.

Le centre de certains d'entre eux est marron, mais très peu sont entièrement marron.

- 35 182.00 - 192.25 m Granite grenu du type 27 assez peu fracturé.
192.65 - 193.25 m : fracture subverticale avec traces de rouille.
193.25 - 194.15 m : - LACUNE -
- 36 194.15 - 197.70 m Granite grenu du type 27 avec des différences au niveau de l'altération des feldspaths.
194.40 - 194.70 : fissure verticale colmatée de teinte rouille.
a) 194.15 - 196.35 m : plagioclases blancs mat et rose orangé soutenu 1555.
b) 196.35 - 196.50 m : plagioclases rose orangé soutenu 1555 et phénocristaux blancs.
c) 196.50 - 196.60 m : gros plagioclases marron rose 4705
d) 196.60 - 196.70 m : fracture à remplissage vert 5777 (zone broyée). Absence de biotites. Les phénocristaux de feldspaths potassiques sont rose pâle orangé 155 et teinte chair 474, 475.
- 37 197.70 - 200.41 m Granite du type 36 d. Fractures nombreuses avec remplissage argileux vert 5777. Nombreux petits minéraux de la même teinte. Peu de biotites.
200.41 - 200.80 m : - LACUNE -
- 38 200.80 - 203.65 m Zone très fracturée. Zone broyée, intensément altérée. Minéraux vert à violet carmin 1985, 4995 près des fractures 60° et subverticales. Plagioclases rose pâle orangé.
- 39 203.65 - 208.70 m Granite grenu du type 27.
- 40 208.70 - 216.70 m Granite du type 36 d.
212.00 - 216.70 m : fracturation 60° et subverticale intense avec remplissage argileux marron foncé 462, 456.
Phénocristaux rose pâle orangé 155, 156.
Produit d'altération vert 4545, 5865.
- 41 216.70 - 223.70 m Roche du type 27.
Phénocristaux altérés de couleur rose pâle orangé 148, 155. Plagioclases rose pâle orangé autour des fractures à remplissage vert. Présence de minéraux verts 586, 584, 5773, 5845.

- 42 223.70 - 246.48 m Granite sain à phénocristaux blancs, très peu fracturé. Quelques cumulats de biotites, de taille centimétrique. Nombreux plagioclases blanc mat 427.
- 43 246.48 - 251.95 m a) 247.67 - 247.95 m : filon riche en biotites.
b) 247.95 - 251.95 m : roche ayant un aspect délavé.
Phénocristaux blancs aux contours très flous.
Plagioclases rubéfiés rose pâle orangé 155, 156, blanc mat marron clair 470, orange 164.
248.90 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert.
- ♦ 96.09 mm : 251.95 m - 544.20 m
- 44 251.95 - 257.20 m a) 252.42 - 252.48 m : amas de biotites.
b) granite de type 43 b avec plagioclases rubéfiés rose pâle orangé 155, 162, orange 159, rose orangé soutenu 1625, 1565.
256.00 - 256.70 m : zone intensément fracturée par accident subvertical à remplissage argileux vert. Bande de 5 cm de roche rose pâle autour de la fracture.
- 45 257.20 - 282.40 m Granite sain du type 42, peu fracturé.
filons à orthoses et biotites :
263.67 - 263.90 m ; 269.30 - 269.65 m ; 275.50 - 275.70 m
268.50 m : fracture subverticale à remplissage vert argileux d'épaisseur 5 à 10 mm.
273.50 m : fracture 60° entourée sur 1 cm d'épaisseur de plagioclases rose orangé soutenu 1555.
Quelques plagioclases rose pâle orangé 155 en relation avec de nombreuses fissures verticales.
Quartz gris 424, orthose maclée gris 429.
- 46 282.40 - 290.80 m Granite grenu peu fracturé avec une plus forte concentration de plagioclases rubéfiés qu'en 45.
Filon à orthose : 286.10 - 286.12 m.
Filon noir riche en biotites : 288.95 - 289.15 m.
- 47 290.80 - 300.70 m Granite grenu du type 27. Peu de fracturation.
- 48 300.70 - 302.70 m Granite du type 36 d. Zone d'intense fracturation.
Intense rubéfaction des feldspaths.
Plagioclases rubéfiés teinte chair 481, 479, marron clair 4655, avec parfois le centre vert 458, 3005.
Beaucoup de minéraux entièrement verts 458, 3995.
Gros phénocristaux teinte chair 472 et rose orangé soutenu 1555.
- 49 302.70 - 309.85 m Granite du type 27. Traces de rouille dans les fractures 60° :
308.40 - 308.42 m
308.55 - 308.63 m

Remplissage argileux vert dans la fracture
304.00 - 304.33 m.

- 50 309.85 - 327.10 m Zone d'altération intense autour d'un système de fracturation 60° à subvertical.
La roche a une teinte générale verdâtre. Il ne reste plus de minéraux blancs, ni de plagioclase rose orangé soutenu.
a) 309.85 - 311.50 m : disparition progressive des minéraux blancs qui prennent une teinte rose.
311.30 - 311.50 m : fracture subverticale à remplissage de quartz et d'argile verte.
A partir de 311.57 m fracturation subverticale et 60° très intense avec apparition de minéraux verts dans la roche.
b) 314.00 - 314.45 m : zone hyperaltérée. La roche est verte. Minéraux verts argileux 5825, 458. Phénocristaux teinte chair 474, 475.
c) 314.70 - 321.45 m : grosses plages de phénocristaux teinte chair 474, 475. Minéraux verts 458, 459.
d) 321.70 - 323.46 m : les plagioclases marron réapparaissent sur cet intervalle.
323.50 m : fracture 60° accompagné d'un cortège de minéraux verts 3 cm de part et d'autre des lèvres.
e) 323.50 - 326.00 m : phénocristaux de teinte chair 474, 475. Minéraux verts 458.
- 51 327.10 - 337.90 m Granite du type 27.
Fracturation subhorizontale.
Fracturation 60° : 33.20, 334.20 m remplissage argileux vert.
332.90 - 333.00 m : phénocristaux rose pâle orangé.
335.78 - 335.90 m : amas de biotite.
- 52 337.90 - 340.00 m Granite assez sombre. Les phénocristaux de feldspath potassique blancs et allongés qui peuvent atteindre 6 cm de longueur.
338.04 - 338.15 m : veine riche en biotites, de pendage 30°.
Fond moyennement grenu et sombre.
338.15 - 338.90 m : zone grenue tourmentée. Nuages de biotites et phénocristaux blancs aux contours flous, fondus dans la masse.
Plagioclases rubéfiés marrons éparpillés dans la roche et plagioclases rose orangé soutenu à proximité des fissures colmatées 60° de la même couleur. Les plagioclases marrons rubéfiés se trouvant à proximité de ces fissures ont leur périphérie rose orangé soutenu.
338.90 - 339.10 m : granite clair au-dessus d'une fracture 60°. Phénocristaux de teinte clair. Majorité de plagioclases rubéfiés rose pâle orangé et teinte chair par rapport aux plagioclases plus foncés.
339.10 - 340.00 m : granite très gris à phénocristaux blancs. Nombreux plagioclases orangés ou blancs avec des taches, rouge, 187.
339.70 m : fracture subhorizontale.

Vers 339.30 et 340.00 m petits amas centimétriques de biotites entourés de plagioclases teinte chair sur quelques mm.

- 53 340.00 - 344.45 m Granite grenu à phénocristaux blancs aux contours flous. Roche très claire à la texture caractéristique : les minéraux, particulièrement les grains de quartz, ont des contours arrondis et sont repris dans un fond blanc mat à teinte chair. plagioclases rubéfiés marron clair 139 et rose orangé soutenu 1555 autour des fractures.
(cf. fig.5)
341.90, 34.70 m : veines riches en biotites orientées à 45°.
340.60 m : fracture subverticale.
341.00 - 431.14 m : fracture 60°.
342.80 - 343.80 m : - LACUNE -
- 54 344.45 - 349.63 m Granite du type 53 plus gris, et aux phénocristaux aux contours plus nets.
Fracturation subverticale importante : 344.80 - 345.83 m, 346.52 - 347.40 m.
Près des fractures les plagioclases sont blanc mat puis, à mesure que l'on s'éloigne, ils deviennent rose orangé pâle 155, 156, puis nettement rubéfiés marron foncé 181. Loin des fractures majorité de plagioclases orangés. Certains phénocristaux zonés de feldspath potassique ont leur périphérie teinte chair sur 1 mm.
- 55 349.63 - 351.10 m a) granite plus clair que les précédents à la texture assez fine sans être microgrenue jusqu'à 350.50 m.
Jusqu'à 350.20 m nombreux phénocristaux blancs ; au-delà ils se raréfient. Nombreux amas de biotites. De manière générale, les minéraux ont un aspect délavé, les plagioclases rubéfiés oranges ayant des contours incertains.
b) 350.90 - 351.10 m : filon de microgranite gris rose de pendage 60°.
350.60 - 350.90 m : texture plus grenue et présence de plagioclases rose pâle orange, teinte chair et plagioclases rubéfiés marron.
- 56 351.10 - 362.40 m Granite du type 55 b. Zone relativement fracturée avec des remplissages argileux verts présentant des traces de rouille.
352.25 - 353.20 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert et traces de rouille.
Aux abords des fractures subverticales, présence de plagioclases blanc mat à rose orangé pâle.
On observe des nuances de blancs à la périphérie des plagioclases blancs mat.
358.30 - 358.40 m : présence de minéraux d'altération verts dans la masse de la roche.
A partir de 360.00 m, prédominance des fractures subverticales sur les fractures 60°.
- 57 362.40 - 377.80 m Granite du type 55 b.

Ø 96.09 mm

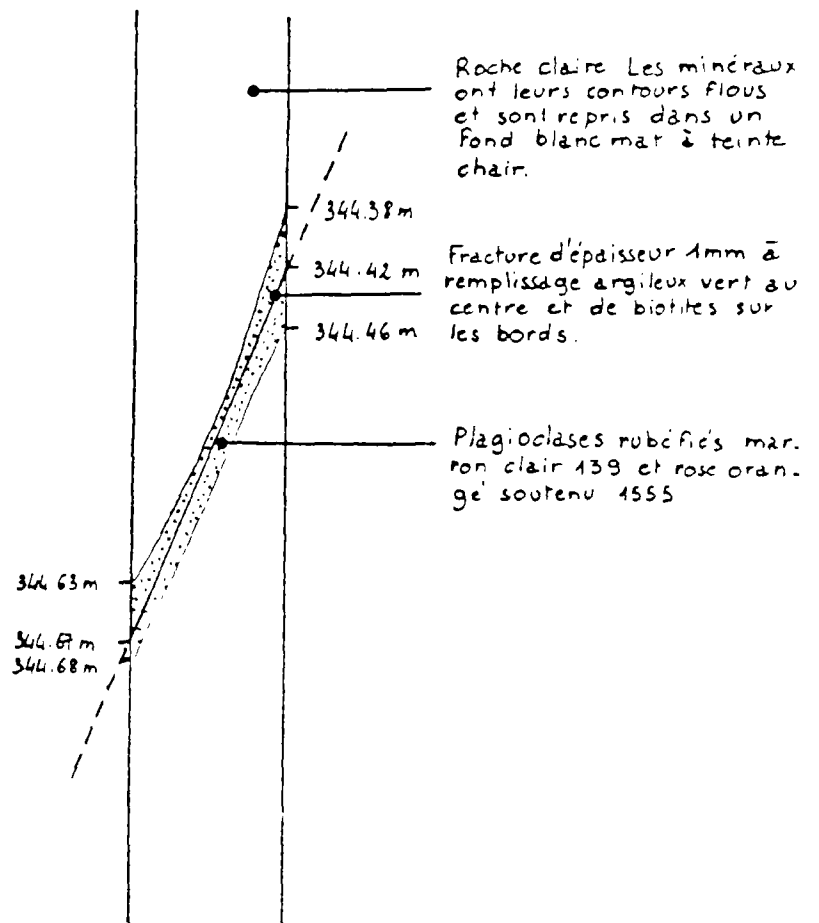


FIG.5

- Nombreuses fractures subverticales avec remplissage
Cumulats de biotites à 368.00 m et 366.40 m.
Vers 366.00 m grande abondance de plagioclases blanc mat.
Phénocristaux de feldspaths potassiques marron clair 4675 et teinte chair 473. Minéraux vert 461.
Plagioclases rubéfiés marron clair 465 et rose orangé soutenu 1555.
- 58 377.80 - 382.90 m Granite microgrenu. Roche grise avec nuages de biotites. plagioclases marrons aux contours blanchâtres ou rose pâle disséminés de manière homogène.
Peu ou pas de phénocristaux.
379.10 - 379.57 m : fracture 60° avec nuage de biotites.
Ces zones riches en biotites contrastent avec celles qui en sont démunies.
380.05 - 380.85 m : fracturation subverticale avec remplissage argileux verts. Intervalle riche en biotites.
Les cumulats de biotite suivent les fractures subverticales.
380.85 - 382.90 m : texture fine. Roche grise avec quelques regroupements en ruban de biotites. Absence de phénocristaux. Quelques minéraux roses pâles, orange et marron aux contours flous.
352.00 - 382.55 m : fracture subverticale avec remplissage argileux vert et blanc ne réagissant pas avec HCl.
- 59 382.90 - 384.75 m Granite très clair et largement grenu. Tous les minéraux sauf le quartz, sont rose pâle. Les biotites sont regroupés en cumulats dont la taille varie de quelques mm à 1 cm.
382.37 - 382.93 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert. Phénocristaux teinte chair.
384.75 m : fracture de pendage inférieur à 60° à remplissage blanc réagissant très peu à HCl.
384.00 m : nuage de biotites.
- 60 384.75 - 388.00 m Granite du type 53. Texture grenue avec de beaux phénocristaux non orientés.
384.75 - 386.63 m : fracturation subverticale à remplissage argileux vert. Autour de cette fracture cumulats et biotites importants. Nombreux plagioclases rubfiés marron délavés, rose pâle orangé et blanc mat.
- 61 388.00 - 388.90 m Granite du type 53.
Zone intensément fracturée verticalement avec important remplissage argileux vert. Entre les fractures tous les minéraux sont rubéfiés (couleur chair) tranchant avec le quartz gris.
Plagioclases rubéfiés marrons à verdâtres quand ils sont très altérés.

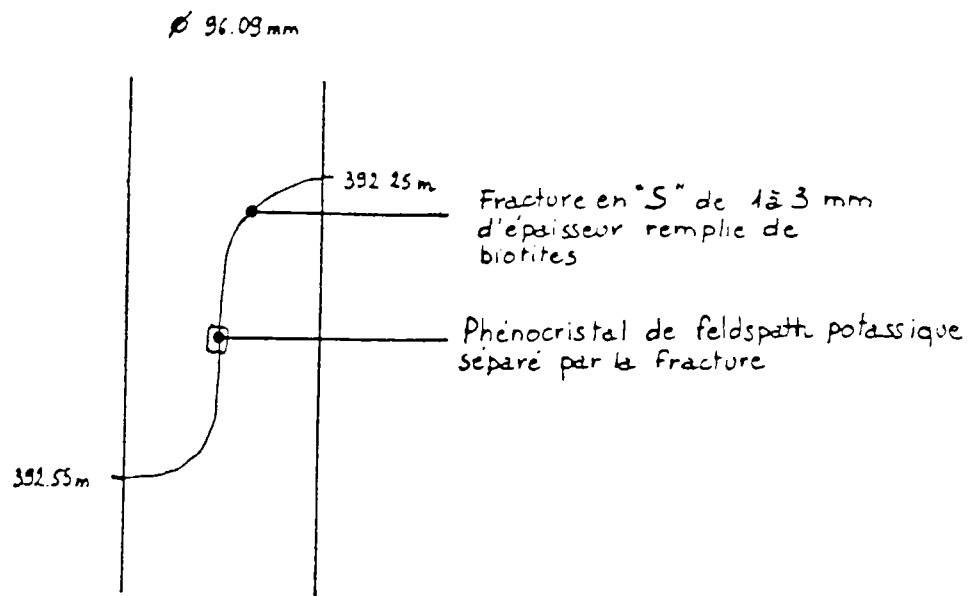


FIG.6

- 62 388.90 - 394.45 m Granite du type 53. Zone fracturée subverticalement.
Les phénocristaux de feldspaths potassiques sont rose pâle orangé 155 et teinte chair 475 à partir de 390.30 m. Plagioclases marron foncé 1815, marron rose 4705, 4715. Minéraux verts 4515, 457 même couleur que le remplissage, fractures subverticales.
392.25 - 392.55 m : fracture en "S" de 1 à 3 mm d'épaisseur remplie de biotites.
(cf.fig.6)
394.20 - 394.45 m : fracture 60° à remplissage argileux vert. Minéraux marrons à verts à 2 cm de la fracture. Présence de phénocristaux rose orangé soutenu 1555 au contact de la fracture.
- 63 394.45 - 394.80 m Granite microgrenu sombre à forte densité de biotites.
394.20 - 394.45 m : fracture 60°.
Quelques plagioclases rubéfiés marron à vert foncé.
Absence de plagioclases rose pâle orangé.
- 64 394.80 - 395.90 m Granite du type 53. Les phénocristaux sont blancs ou teinte chair très clair. Nombreux plagioclases marron pouvant être entourés d'un liséré rose pâle orangé.
A partir de 395.70 m les phénocristaux deviennent rose pâle et les plagioclases marron disparaissent progressivement au profit des plagioclases marron foncé à vert aux abords de la fracture subverticale (395.15 m).
- 65 395.90 - 396.40 m Zone à fracturation subverticale à remplissage argileux vert et rouge. Ce système de fractures s'accompagne de tout un réseau de fissures marron.
Plagioclases rubéfiés rose orangé soutenu et marron foncé à très foncé dans les zones les plus fracturées.
- 66 396.40 - 404.70 m Granite du type 53.
Fractures subhorizontales : elles n'ont apparemment que peu d'influence sur l'altération. En effet, on ne note pas d'influence sur la coloration des minéraux en présence.
399.00 m : traces de rouille marron foncé 175.
Dans cette zone les phénocristaux de feldspath potassiques sont légèrement roses, surtout près des fractures subverticales.
399.55 - 399.90 m : fracture 60° à remplissage argileux vert.
400.10 - 402.00 m : importante fracture subverticale.
Certains phénocristaux sont traversés par cette fracture à remplissage vert et d'épaisseur de 1 à 3 mm, sans être décalés. Phénocristaux de teinte chair 474.

Ø 96 09 mm

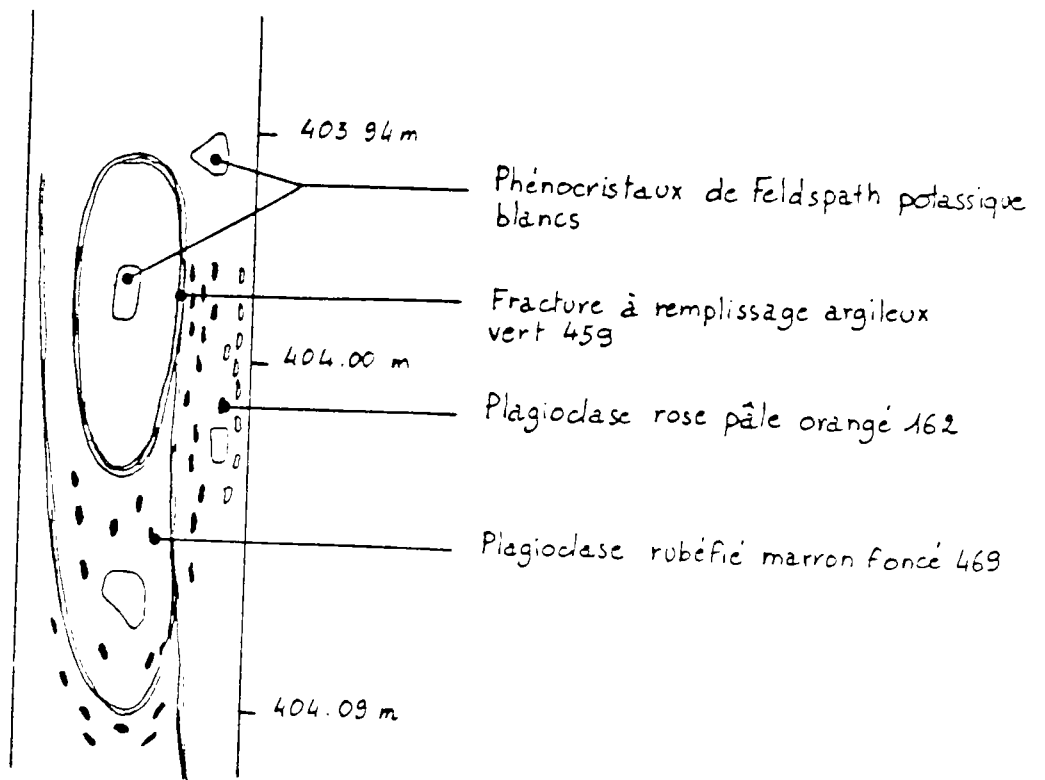


FIG. 7

Plagioclases marron foncé 469 et marron rose 4695 majoritaire par rapport aux plagioclases teinte chair 473.

402.00 - 403.00 m : phénocristaux blancs.

Plagioclases marron rose 7405, 4715, 4695 et rose pâle orangé 162.

Vers 404.70 m : zone affecté par une fracture subverticale à remplissage argileux vert 459.

(cf.fig.7)

- 67 404.70 - 405.00 m Granite microgrenu rose pâle, fracturation 45°.
- 68 408.00 - 406.70 m Granite du type 53. Les phénocristaux sont poses pâles. Nombreux plagioclases marron. Fissures subverticales colmatées de teinte rose de 406.35 à 406.60 m. Celles-ci sont accompagnées d'un cortège de plagioclases roses.
- 69 406.70 - 418.00 m Granite du type 53 largement grenu. Phénocristaux de Feldspaths potassiques blancs avec des zonations rose pâle orangé 155. Nombreux plagioclases blancs mat, marron rose rubéfiés 4705, 4715, 4695. Petites taches rouges 180 au centre des plagioclases blanc mat. 409.85 - 410.00 m : fracture 60° à remplissage argileux vert avec présence de minéraux verts jusqu'à 1 cm à partir des lèvres, dans la masse de la roche.
- 70 418.00 - 442.90 m Granite grenu du type 53.
a) 418.20 - 418.37 m : (cf.fig.8)
Plusieurs fractures 60° parallèles 418.95 m. Dans cette zone les fissures colmatées semblent avoir plus d'impact sur l'altération que les grosses fractures, ce qui donne un effet d'altération dans la masse.
b) 419.24 - 419.67 m : fracture subverticale d'épaisseur variant de 4 à 6 mm de couleur verdâtre et réagissant avec HCl : produite de remplissage contenant de la calcite.
Des minéraux se trouvant à son contact prennent une teinte rose, particulièrement les phénocristaux. Les plagioclases rubéfiés marron se trouvent au minimum à 2 cm de la fracture, vert le bas.
c) 419.75 - 420.39 m : prépondérance en nombre des plagioclases marron avec liséré peu décoloré par rapport aux plagioclases rose pâle orangé et rose orangé soutenu.
Fissures blanches très fines (2 cm d'épaisseur en moyenne), horizontales à 420.25 m et 420.34 m. Bande plus claire au sommet de chacune d'entre elles.
d) 420.39 - 421.87 m : zone affectée par une fracture verticale d'épaisseur centimétrique. prédominance des plagioclases rose pâle et teinte chair notamment de 421.60 à 421.87 m où la fracturation est intense.
Nombreux plagioclases marron foncé à clair dont la périphérie est altérés (liséré clair).

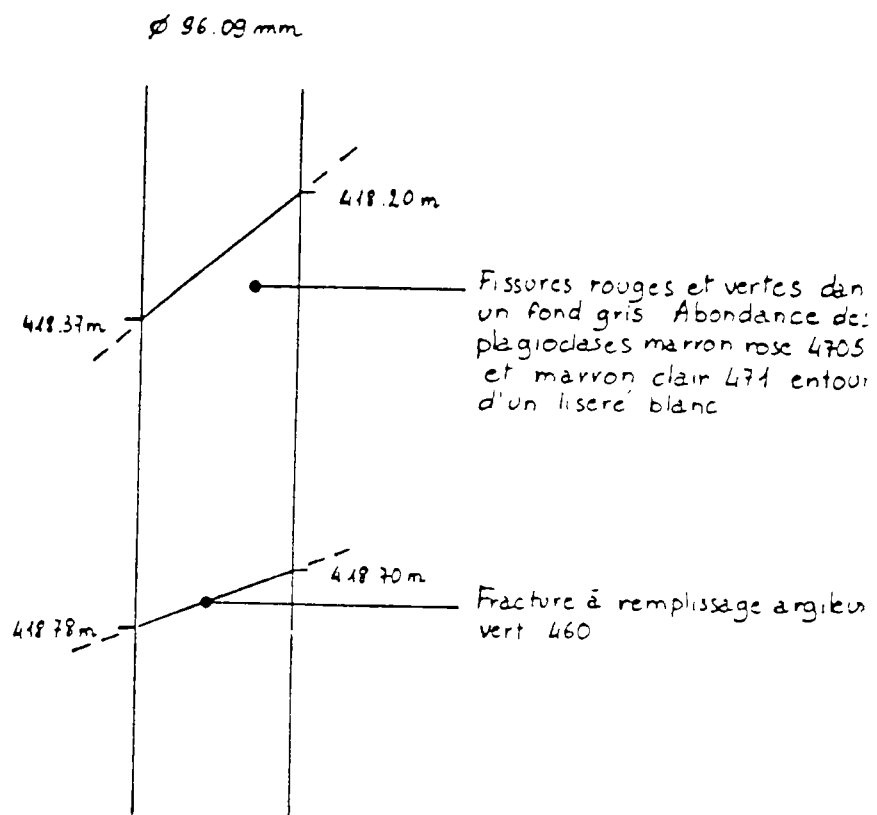


FIG.8

c) 421.87 - 422.80 m : changement brutal de faciès. les phénocristaux redeviennent blancs et les plagioclases rubéfiés marron majoritaires par rapport aux plagioclases rose pâle et teinte chair. (cf. fig. 9)

d) 422.80 - 426.50 m : zone affectée par de nombreuses fractures 60° : 424.00 - 424.25 m ; 424.70 - 424.90 m ; 425.16 - 425.30 m ; 425.46 - 425.58 m ; 425.95 - 426.16 m.
La fracturation intense s'accompagne d'une prédominance des plagioclases rose pâle orangé et teinte chair par rapport aux plagioclases marron rubéfiés.
Les phénocristaux de feldspath potassique sont de teinte chair à rose pâle orangé notamment près des fractures. Les fractures ont un remplissage argileux vert.

fig. 10 : séquence d'altération centrée sur deux fractures à remplissage argileux vert : 425.94 - 426.14 m ; 426.25 m.
La progression de l'altération à partir des fractures est ascendante plutôt que descendante.

e) 426.50 - 433.00 m nombreuses fractures 60° à remplissage argileux compact vert avec éventuellement présence de calcite. l'épaisseur de ces fractures peut atteindre 10 cm : 426.53 - 426.64 m ; 426.88 - 426.99 m ; 427.09 - 427.22 m ; 427.24 - 427.33 m ; 428.43 - 428.52 m (épaisseur = 1 à 2 cm) ; 428.57 - 428.59 m ; 428.83 - 428.97 m ; 429.40 - 429.53 m ; 429.86 - 430.27 m (épaisseur = 2 à 10 cm) ; 430.60 - 430.70 m.
De 430.70 à 433.00 m : fissures colmatées 60° ou subverticales plutôt que fractures.





f) 433.00 - 442.90 m : granite moins fracturé et à l'aspect plus sain que précédemment.
Phénocristaux zonés blancs à marron clair 468.
Plagioclases rose pâle sont peu nombreux, notamment dans les zones éloignées des fractures.
Fractures 60° : 434.85 - 434.97 m (teinte marron) ; 439.69 - 439.81 m (remplissage argileux vert et marron) ; 440.80 - 440.95 m (remplissage argileux compact vert et calcite).
Fracture 30° : 437.03 - 437.08 m.
441.06 - 441.10 m : granite microlithique rose assez foncé du type des fines bandes décrites en 70 c.
Les biotites semblent avoir "sédimenté" et forment une bande rose foncé de 0.5 mm vers le bas.

71 442.90 - 454.30 m

Zone intensément fracturée et altérée

a) 442.90 - 444.05 m : fracture subverticale. Les feldspaths sont tous rose pâle. Certains phénocristaux ont le centre blanc. Très peu de plagioclases marron. Très peu de biotites et très altérées. Nombreux plagioclases verts automorphes et par conséquent peu de plagioclases marron.

b) 444.05 - 444.71 m : zone très fissurée. les fissures colmatées sont enchevêtrées et de couleur verte à marron foncé.

-  Plagioclases rubéfiés marrons majoritaires par rapport aux plagioclases rose pâle
-  Plagioclases rose pâle majoritaires par rapport aux plagioclases rubéfiés marrons
-  Proportion égale de plagioclases rubéfiés marrons et de plagioclases rose pâle
-  Domaine des plagioclases marron foncé

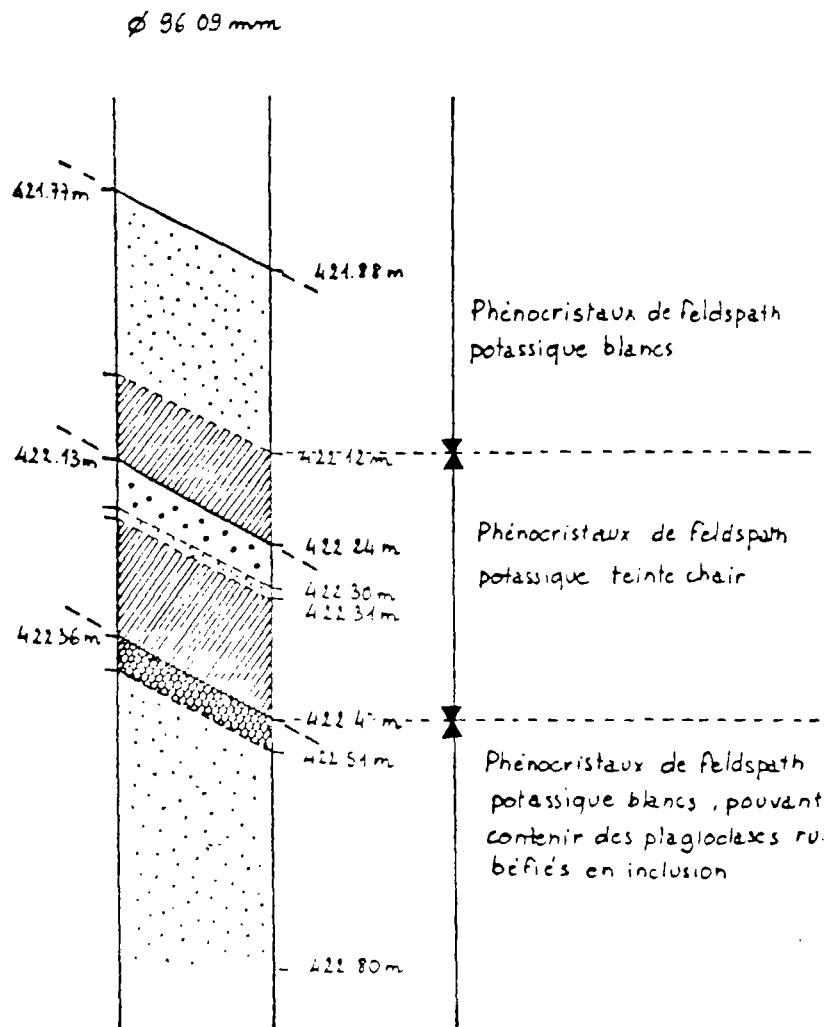


FIG.9

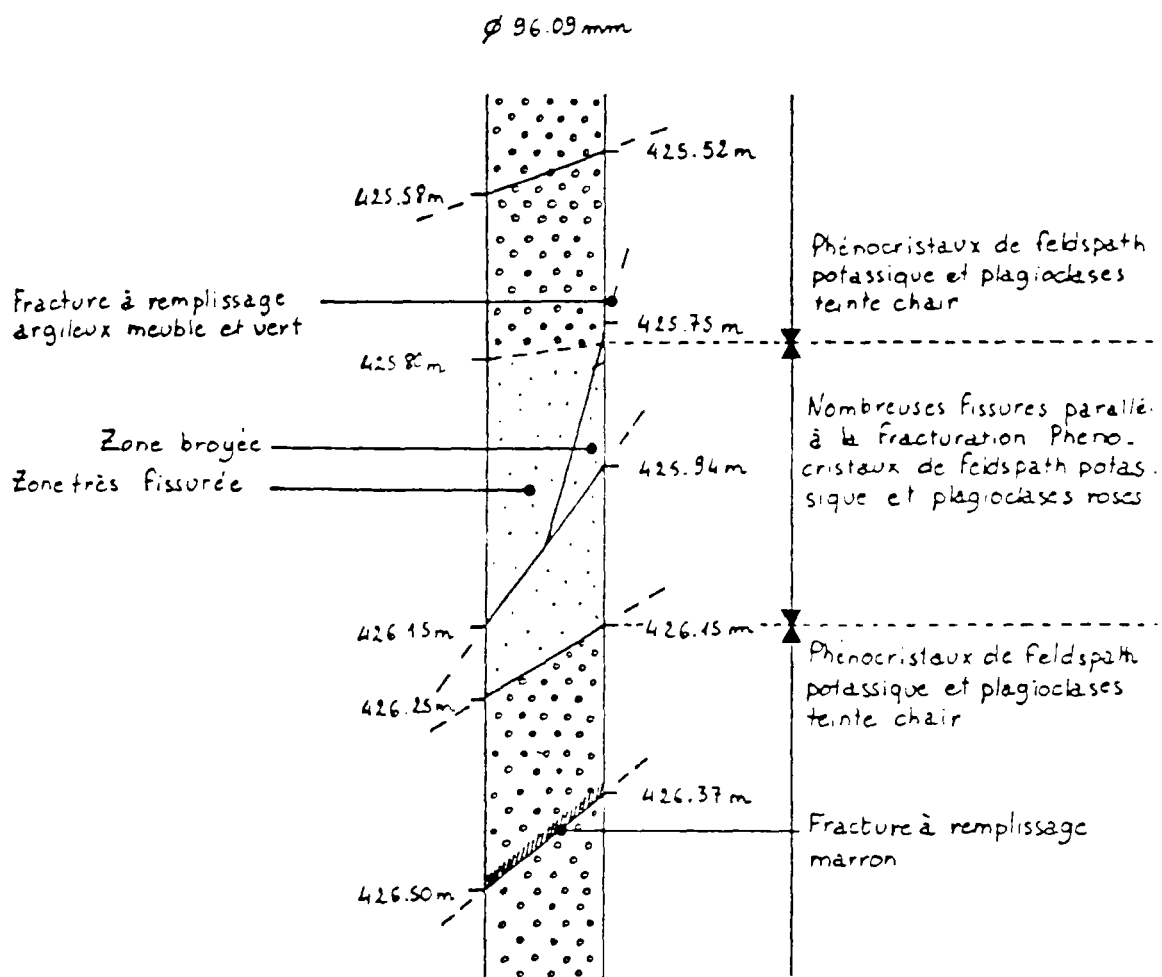


FIG.10

Nombreux plagioclases vert olive.
 Peu de biotites, regroupées en cumulas quand elles existent.
 Fracture 60° : 444.59 - 444.71 m. Présence de plagioclases marron foncé à ses abords.
 c) 444.86 - 445.66 : zone très fissurée (fissures colmatées). Rubéfaction généralisée de tous les feldspaths en rose pâle.
 (cf. fig. 11)
 d) 445.66 - 446.70 m : zone hyperfissurée (fissuration colmatées). Différence de teinte d'ensemble par rapport à 71 c. Les minéraux rubéfiés précédemment rose pâle, deviennent rose orangé soutenu à orange et le fond gris tire sur le bleu vert. Il subsiste quelques plagioclases rubéfiés marron foncé.
 e) 446.70 - 449.50 m : zone très fracturée et fissurée
 448.50 à 449.00 m il ne subsiste pratiquement plus de biotite. Tous les feldspath sont rose orangé soutenu ou teinte chair. Les systèmes de fracturation et fissuration sont complexes. La plupart des fissures sont colmatées par un produit argileux vert qui confère une teinte verdâtre à l'ensemble de la roche.
 f) 449.50 - 450.28 m : zone broyée et apparemment recristallisée. Tous les minéraux rubéfiés rose orangé soutenu sont xénomorphes et ont des formes tourmentées. Phénocristaux rose orangé soutenu 1555. Quartz gris 428.
 450.10 m : fracture subhorizontale à remplissage argileux vert 5783, 5793.
 g) 450.40 - 451.69 m : zone intensément fracturée 30° à 60°. Réapparition des biotites et des phénocristaux de feldspath potassique rose orangé soutenu 1555. Quartz gris 422. Absence de remplissage vert dans les fissures.
 Remplissage vert argileux dans les fractures ouvertes : 450.72 - 450.80 m ; 450.83 - 450.89 m ; 450.98 - 451.10 m ; 451.16 - 451.38 m ; 451.17 - 452.10 m.
 h) 451.90 - 452.25 m : vert 451.90 m, présence d'une enclave grise rosâtre pluricentimétrique suivie d'une veine à orthose aux mégacristaux teinte chair. Le tout est très fissuré. Les biotites se regroupent en cumulats et ont un aspect altéré.
 i) 452.25 - 454.23 m : fracturation 60°, subverticale et subhorizontale. Réapparition des biotites d'aspect de plus en plus sain en allant vers le bas.
 Les plagioclases rubéfiés rose orangé soutenu et teinte chair sont en plus grand nombre que les plagioclases rubéfiés marron clair et marron foncé qui ont un aspect altéré.

72 454.30 - 461.30 m a) 454.30 - 455.40 m : granite largement grenu. Les phénocristaux de feldspath potassique sont dans l'ensemble blancs. Les plagioclases rubéfiés rose pâle, rose orangé soutenu et teinte chair et

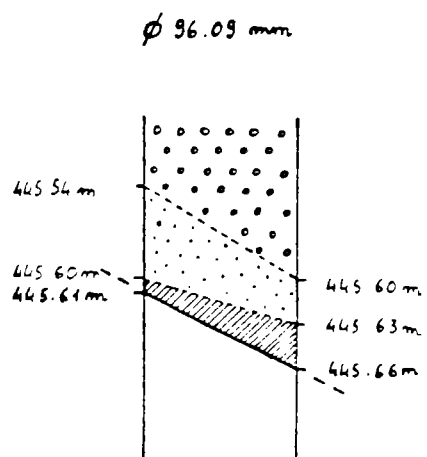
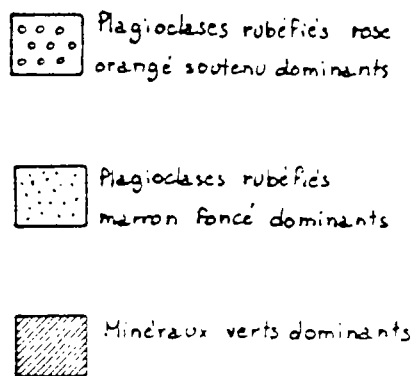


FIG.11

les plagioclases rubéfiés marron et marron foncé sont en proportions égales.

b) 45.40 - 45.64 m : veine à orthose avec cumulats de biotites.

c) 455.64 - 457.60 m : granite du même type que 72 a.

Altération des plagioclases au niveau des fractures 60°.

Fracturation : 457.15 - 457.36 m.

(cf. fig.12)

d) 457.60 - 458.10 m : zone très fissurée (fissuration colmatée) sans être fracturée. Disparition de tous les plagioclases rubéfiés marron.

Les plagioclases sont tous rose pâle à rose orangé soutenu.

e) 458.10 - 461.30 m : granite grenu clair.

459.00 - 459.10 m : fracture avec présence d'une enclave de granite microgrenu rose foncé remontant par une fissure colmatée jusqu'à 458.84 m. Abondance de plagioclase marron aux abords de cette dernière (bande de 1 à 2 cm).

460.20 - 460.33 m : zone très riche en biotites traversée par une fissure colmatée subverticale de couleur rose orangé soutenu.

460.76 - 460.90 m : zone claire à mégacristsaux blancs à teinte chair. Plagioclases marron et rose pâle. Cumulats verts (biotites chloritisées).

73 461.30 - 477.30 m Granite homogène à fond grenu. Quartz gris sombre contrastant avec les plagioclases rubéfiés rose orangé soutenu. Quelques passages de granite microgrenu rose.

463.17 - 463.30 m : fracture 60° sans remplissage.

464.08 - 464.32 m : fracture subverticale à remplissage compact vert. Minéraux verts 460 à proximité de cette fracture (1 cm). Plagioclases rubéfiés marron rose 4705 et phénocristsaux de feldspath potassique teinte chair 474.

473.20 - 473.60 m : granite microgrenu rose traversé par une fissure colmatée à remplissage de quartz, subverticale discontinue. On note que le bois de l'enclave est plus sombre que le haut qui est rose assez vif. Les minéraux sombres semblent avoir "sédimenté".

473.60 - 474.00 m : fissure colmatée avec remplissage de biotites par endroit. Les plagioclases en contact avec la fissure sont rose orangé pâle dans un environnement où les autres plagioclases sont rubéfiés marron.

471.23 - 477.40 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert et meuble (se décroche avec l'angle).

74 477.30 - 482.15 m Granite grenu contenant des phénocristsaux de feldspath potassique blancs et des plagioclases rubéfiés marron. Ce granite s'altère plus particulièrement au niveau de la fracturation

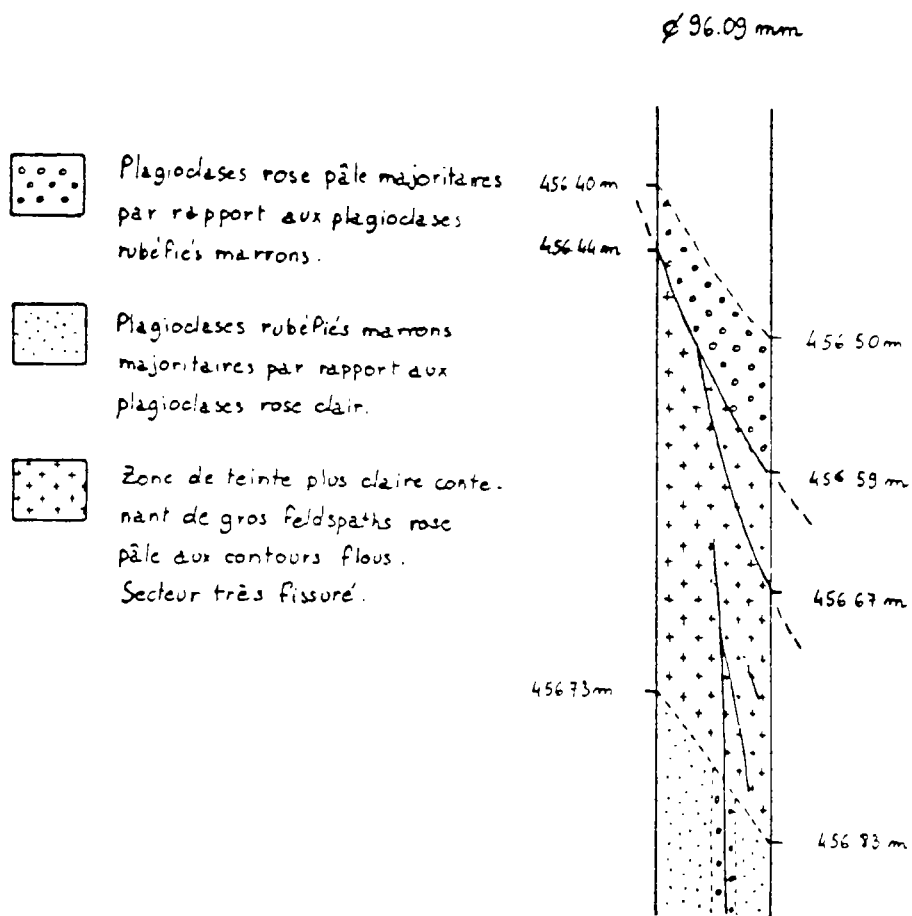


FIG.12

subverticale. La roche prend alors une teinte générale rose pâle.

477.85 - 478.00 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert.

478.22 - 478.27 m : fracture 45° d'épaisseur inférieure à 1 mm et à remplissage compact vert.

477.85 - 478.27 m : granite de teinte dominante rose

479.29 - 479.85 m : granite de tiente dominante rose fracture subverticale de 479.40 à 479.85 m.

(cf. fig.13)

479.85 - 482.15 m : granite grenu à phénocristaux blancs plagioclases rubéfiés marron.

480.25 - 480.50 m : passage riche en biotite ou ressortent des phénocristaux de feldspath potassique parfaitement blancs. Les minéraux sont orientés dans des plans de pendage 60° environ.

- 75 482.15 - 485.45 m Granite du type 74 plus altéré cependant
a) 482.15 - 483.20 m : fig.14.
b) 483.20 - 483.30 m : fracture 45°.
c) 483.30 - 485.40 m : granite clair contenant des phénocristaux de feldspath potassique aux contours flous.
d) 485.20 - 485.45 m : granite du type 74.
- 76 485.45 - 487.45 m Zone très fissurée de 486.00 à 487.45 m. Les fissures colmatées sont de couleur verte et rouge, et forment des arborescences. Les feldspaths sont de teinte rose pâle ou rose chair. Cette zone intensément fissurée est délimitée vers le bas par une fracture 487.40 - 487.35 m.
- 77 487.45 - 489.20 m Granite fracturé du type 74.
(cf. fig.15)
- 78 489.30 - 492.50 m a) granite clair affecté par une fracturation subverticale.
489.30 - 489.54 m ; 489.40 - 489.40 - 490.07 m. Plagioclases rubéfiés orangés 163 et rose pâle orangé 156.
491.00 m : phénocristal de feldspath potassique de 10 cm de longueur.
b) 491.00 - 491.95 m : fissuration verticale colmatée accompagnée de minéraux aux teintes pastels.
c) 491.95 - 492.50 m : granite du type 74.
- 79 492.50 - 492.73 m Granite très clair à gros minéraux. Fissuration colmatée verticale comparable à celle décrite en 78 b.
- 80 492.73 - 493.04 m Enclave sombre riche en biotites. La fissuration décrite en 79 affecte l'enclave.
- 81 493.04 - 493.90 m Granite du type 74.
- 82 493.90 - 494.90 m Granite clair à phénocristaux blancs.

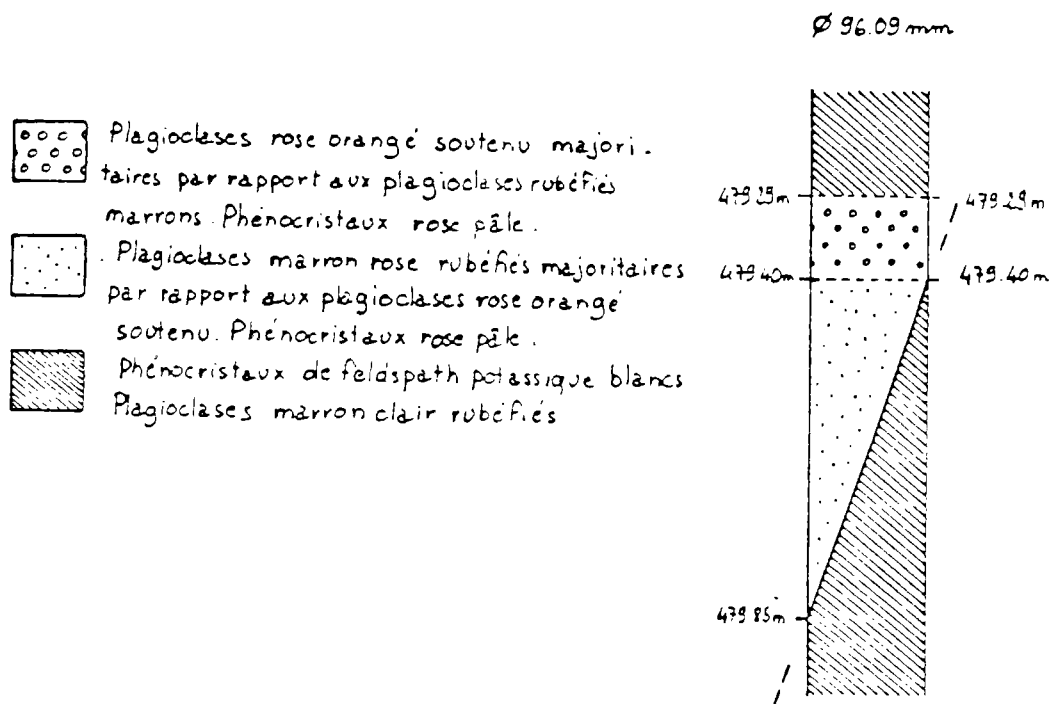


FIG.13

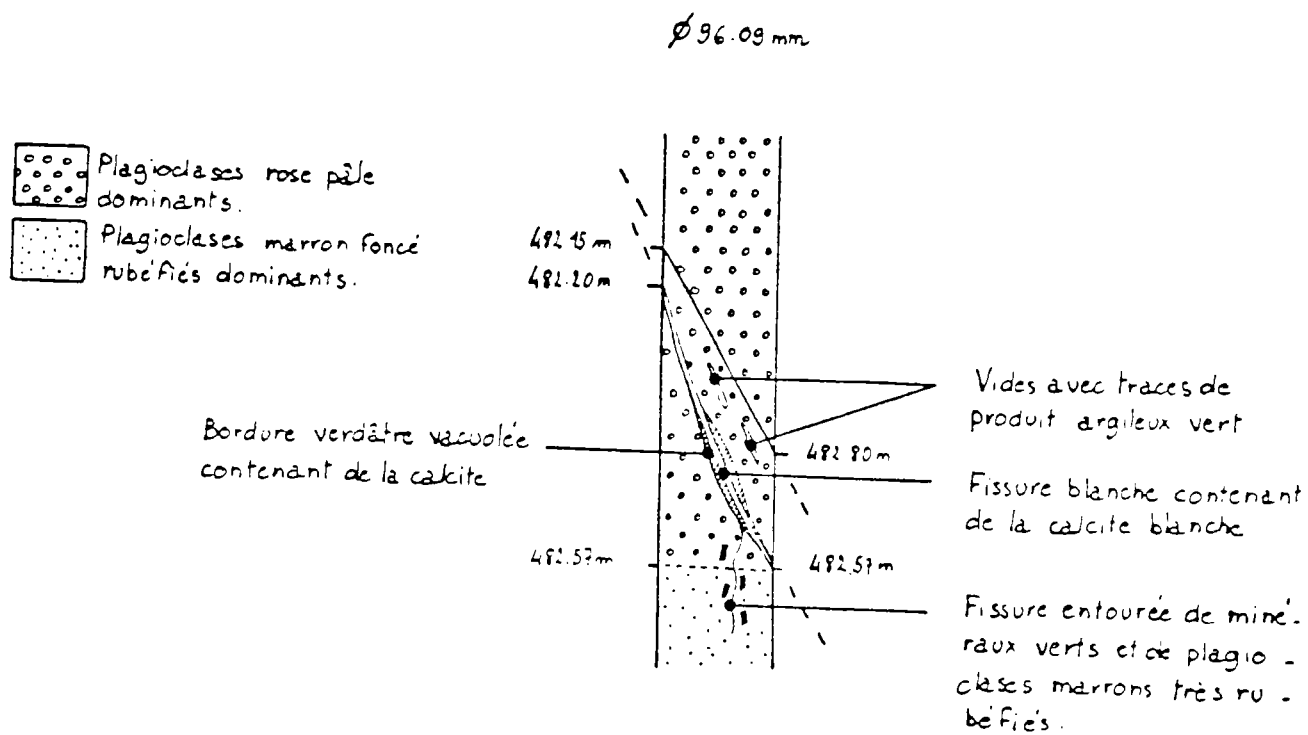


FIG.14

Ø 96.09 mm



Plagioclases rose orangé pâle
et teinte chair dominants



Plagioclases rubéfiés marrons
dominants

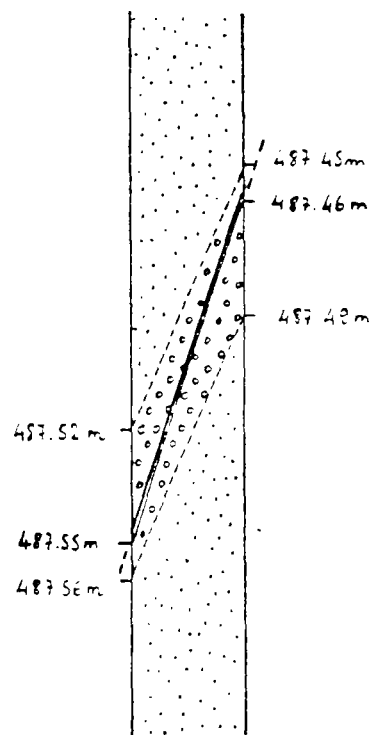


FIG.15

- 494.45 - 494.90 m : petites fissures colmatées verticales. Nombreux plagioclases rubéfiés marron et marron rose.
- 83 494.90 - 495.10 m Filon à orthose avec cumulats centimétriques de biotites.
Présence de quelques plagioclases rubéfiés rose pâle, teinte chair et marron.
- 84 495.10 - 505.00 m Granite du type 74 à l'aspect plus ou moins délavé.
495.33 - 495.61 m : fracture à remplissage de calcite au centre et à bordure de couleur marron. L'épaisseur du remplissage de la fracture peut atteindre 1 cm.
fractures : 498.20 - 498.32 m ; 498.20 - 498.39 m.
(cf. fig. 16)
501.25 - 503.40 m : zone à fissures colmatées verticales avec remplissage de biotites. Le centre des fissures contient éventuellement un produit de remplissage argileux vert d'épaisseur inférieure à 1 mm.
Ces fissures traversent la fracture 60° (501.70 - 501.92 m) à remplissage argileux vert
502.75 - 503.00 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert d'épaisseur non mesurable.
- 85 505.00 - 508.70 m Granite très clair intensément fissuré verticalement. Les fissures colmatées ont une couleur verte et rouille. La roche garde un aspect délavé. Présence de nombreux plagioclases rubéfiés marron foncé.
505.30 - 508.10 m : - LACUNE -
508.64 - 508.95 m : enclave de granite très finement grenu de teinte rose.
- 86 508.70 - 517.00 m Zone très altérée.
a) 508.70 - 509.70 m : granite du type 74 à l'aspect délavé.
Plagioclases rubéfiés marron, rose pâle et orange.
509.80 - 509.95 m : fracture.
b) 509.70 - 511.40 m : zone où les plagioclases orange rouille sont majoritaires par rapport aux plagioclases rubéfiés marron. Les biotites ont des reflets verdâtres (chloritisation).
Fractures : 510.92 - 511.08 m ; 511.40 m.
c) 511.40 - 512.00 m : absence des plagioclases rubéfiés marron. Tous les feldspaths sont rose pâle. Certains d'entre eux présentent des nuances verdâtres près des fissures colmatées. Les biotites sont très altérées (chloritisation pratiquement totale).
d) 512.00 - 513.35 m : zone hyperaltérée. Fissuration intense donnant à la roche une teinte uniforme rose verdâtre. Les fissures ont un remplissage verdâtre ou blanc (ne réagissant pas à HCl : dolomite). Nombreuses traînées d'oxydes de fer rouille foncée.

Les fractures sont à remplis-
sage argileux vert.
Le granite est clair et con-
tient de gros minéraux blancs
à contours flous.

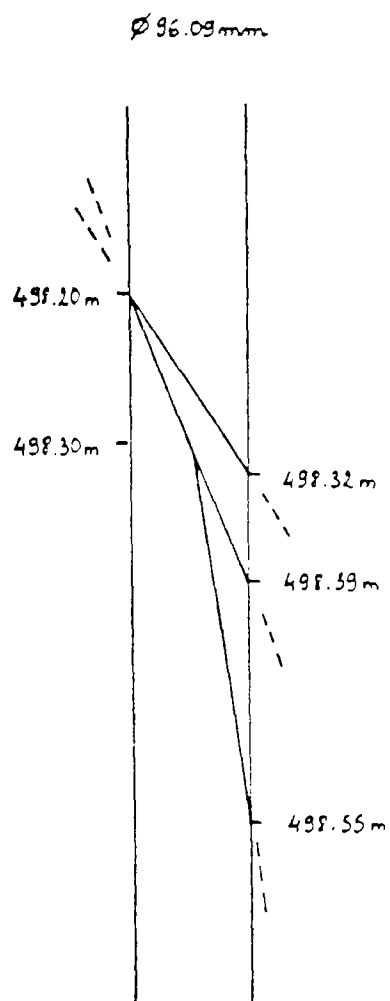


FIG.16

e) 513.35 - 513.88 m : granite du type 86 c.
Phénocristaux de feldspath potassique de teinte chair 472, 473 et rose orangé soutenu 1555. Quartz gris 422, plagioclases rubéfiés violet carmin 4985 et rose pâle orangé 162 et marron clair 4665.

f) 513.88 - 517.05 m : granite du type 74 à phénocristaux de feldspath potassique blancs. Quelques fissures horizontales sans conséquences apparentes sur l'altération des feldspaths.

87 517.00 - 535.80 m Large intervalle homogène de granite largement grenu aux phénocristaux de feldspath potassique blancs, gris "warm gray 2C", ou rose orangé soutenu 1565. Ceux-ci sont grands et trapus (3 à 4 cm). Les plagioclases rubéfiés marron sont souvent décolorés à leur périphérie.

Fractures 60° tous les 1 à 2 m avec remplissage argileux vert. les fractures subhorizontales sont plus fréquentes mais sans effets visibles sur l'altération des minéraux.

527.50 m : couche de biotite de 1 cm d'épaisseur

530.70 m : fracture subverticale à 60°, à remplissage argileux vert 451, 4505 (1 cm d'épaisseur). Les plagioclases aux abords (1 cm) de cette fracture sont rose pâle ou teinte chair.

88 535.80 - 535.90 m Deux couches de granite microgrenu de teinte chair 479 à marron rose 4725. Plagioclases rubéfiés marron rose et marron foncé.

89 535.90 - 540.05 m A 535.45 m, couche de granite microgrenu du type 88. Au-delà granite largement grenu avec de nombreux plagioclases rubéfiés rayés et rose orangé soutenu.

336.73 - 337.07 m : fracture subverticale à remplissage de calcite blanche. Les plagioclases ne sont pas décolorés à ses abords.

Les zones 88 et 89 se distinguent par l'abondance des plagioclases rouges.

(cf. fig. 17)

90 540.05 - 541.92 m Granite du type 74 à phénocristaux de feldspath potassique blanc et plagioclases rubéfiés marron à la périphérie décolorée.

91 541.92 - 544.20 m Granite largement grenu comprenant de nombreux phénocristaux blancs mais surtout caractérisé par la présence de gros plagioclases marron rose dont la taille varie de quelques mm à 1 cm.

542.85 - 543.20 m : zone comprenant des phénocristaux de grande taille : 10 cm.

Ø 76.00 mm : 544.20 m 1003.15 m

92 544.20 - 550.00 m Granite du type 87.

546.00 - 547.00 m : fracture subverticale à remplissage d'un produit pulvéulent verdâtre contenant de la calcite

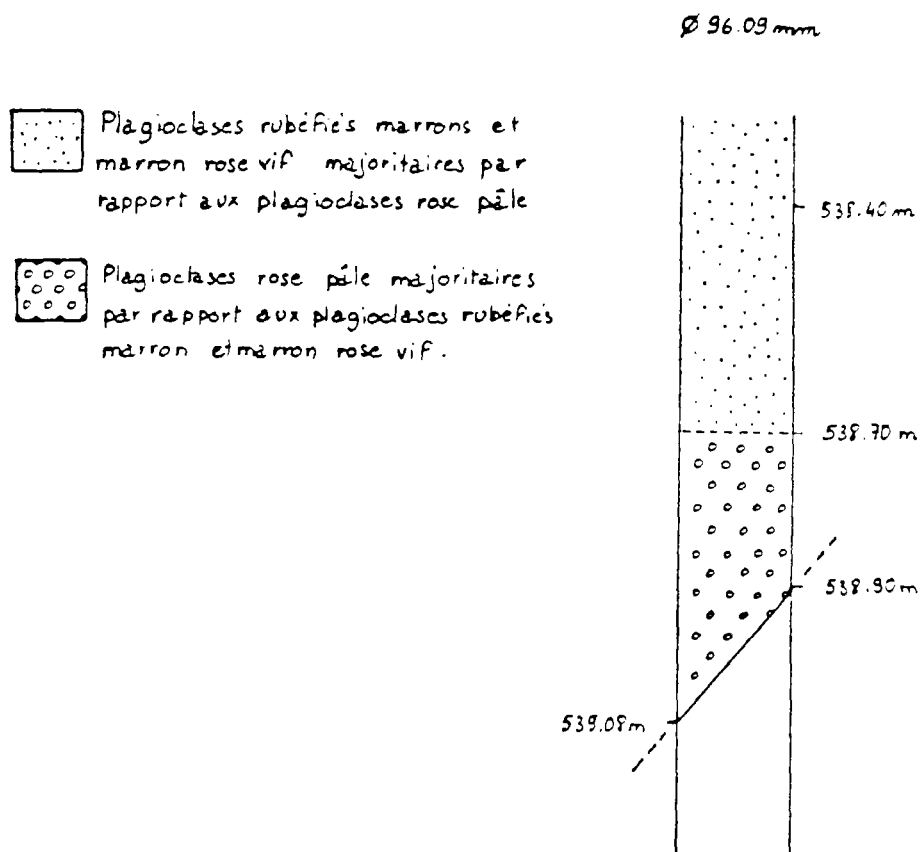




FIG.17

- 547.00 - 549.80 m : - LACUNE -
- 93 550.00 - 551.00 m Granite grenu contenant de gros et nombreux plagioclases marron rose rubéfiés. Fissuration subverticale peu importante. 550.77 - 550.86 m : enclave de granite microgrenu rose.
- 94 551.00 - 552.62 m Granite contenant des phénocristaux rose-pâle. De 551.90 à 552.62 m, la concentration en gros plagioclases marrons rose rubéfiés augmente mais sans atteindre le nombre observé en 93. Nombreuses fractures 60°.
- 95 552.62 - 555.00 m Tous les feldspaths sont roses. Milieu très microfissuré. Peu de plagioclases rubéfiés marron qui sont petits quand ils existent. Nombreux plagioclases vert rose.
a) 553.49 - 553.57 m : fracture 60° à remplissage argileux vert.
b) 554.00 - 554.67 m : granite du type 87 contenant très peu de phénocristaux de feldspath potassique et de nombreux petits plagioclases rubéfiés marron.
c) 554.67 - 555.00 m : granite du type 93.
- 96 555.00 - 568.74 m Zone très particulièrement cataclasée. Fond rose orangé soutenu 1555 à teinte chair 472, 473 et 474. Minéraux verts 5773, 450, 4808. Il s'agit de dolomite (analyse par diffractométrie de rayons X) colorée en vert par un peu de chlorite.
- 97 568.74 - 589.43 m Ensemble homogène de granite grenu à gros phénocristaux de feldspath potassique. Les plagioclases rubéfiés marron sont le plus souvent petits et décolorés à leur périphérie mais omniprésents.
575.00 - 577.00 m : veine à orthose et cumulats de biotites.
583.16 - 585.25 m : couches de biotites.
587.07 - 588.00 m : filons de granite microgrenu rose.
588.00 - 588.60 m : granite du type 93.
588.00 - 588.43 m : granite grenu aux couleurs délavées. Peu de plagioclases rubéfiés marron et rose pâle.
- 98 589.43 - 623.50 m Granite microgrenu au sens strict du terme. Les minéraux sont petits mais visibles. Sauf de rares passées, il y a toujours quelques phénocristaux clairsemés.
a) 589.43 - 590.60 m : granite microgrenu gris. Les phénocristaux sont gris 407. Nombreux points rouges 180. Absence de plagioclases rubéfiés marrons.
b) 590.60 - 593.30 m : granite microgrenu marron rose 4725, 4715. Plagioclases rose orange soutenu 1555, marron rose 4695. Les phénocristaux de feldspath potassique sont blancs. (cf. fig 18).
593.10 - 593.20 m : fracture 60°.

-  Plagioclases rubéfiés marrons
majoritaires par rapport aux
plagioclases rose pâle.
-  Plagioclases rose pâle majoritaires
par rapport aux plagioclases rubé-
fiés marrons.

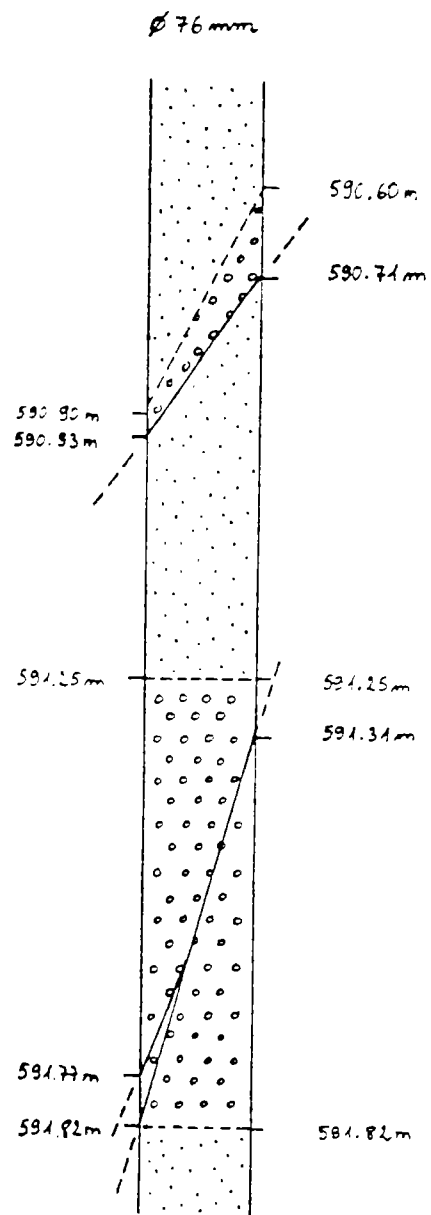


FIG.18

c) 593.30 - 596.48 m : granite gris très peu fracturé. Fond gris 404. Plagioclases rubéfiés marron rose 483, marron foncé 4975 et teinte chair 472.

594.43 - 594.57 m : fracture entourée de plagioclases rose pâle, teinte chair. Phénocristaux de teinte chair.

d) 596.48 - 670.00 : fracturation complexe (cf. fig. 19).

596.60 - 598.40 : fracturation et fissuration colmatée subverticales à remplissage vert d'épaisseur variant de 1 à 3 mm.

e) 600.70 - 612.37 m : granite microgrenu à fond gris.

plagioclases rose pâle orangé 156, teinte chair 472 et violet carmin.

602.70 - 603.36 m : fracture subverticale à remplissage argileux vert 4535 et marron clair 146. Plagioclases teinte chair 2 cm autour de la fracture.

603.70 - 605.70 m : - LACUNE -

608.33 - 608.70 m : fracture très fine.

608.80 - 610.67 m : - LACUNE -

610.67 - 612.07 m : granite microgrenu de teinte chair 473. Petits plagioclases marron foncé 477.

612.06 - 612.37 m : - LACUNE -

f) 612.37 - 613.00 m : granite microgrenu teinte chair 473 et marron clair 4665.

Quartz gris "cool gray 8C-7C" remplissant les fractures. La croissance des cristaux est visible et souvent n'est pas suffisante pour combler la totalité de la fracture. Présence de pyrite (doré 871).

g) 614.00 - 617.00 m : granite microgrenu à fond marron clair 4665, 4675. Forte concentration de plagioclases rubéfiés marron rose 4695 avec liséré décoloré.

Nombreuses fissures parallèles subverticales colmatées marron clair 139.

h) 617.30 - 619.11 m : granite dont la texture est intermédiaire entre grenue et microgrenue. Fond de teinte chair 473, 474. Plagioclases rubéfiés marron foncé 490. On remarque que les phénocristaux de feldspath potassique sont rose à leur périphérie.

A 618.10 m, un phénocristal zoné de 7 cm de longueur est traversé par une veine de quartz qui ne semble pas l'affecter au point de vue de l'altération.


618.55 - 619.10 m : - LACUNE -


i) 619.55 - 623.30 m : granite microgrenu gris particulièrement entre 621.00 et 623.00 m.

620.50 - 620.85 m : fracture subverticale à remplissage argileux compact vert.

99 623.50 - 627.50 m

Granite microgrenu à forte proportion de phénocristaux de feldspaths potassiques blancs et marron clair 4685. Petits plagioclases rubéfiés violet carmin 5005 en trop faible proportion pour

 Plagioclases rubéfiés marrons
majoritaires par rapport aux
plagioclases rose pâle.

 Plagioclases rose pâle majori-
taires par rapport aux plagio-
clases rubéfiés marrons

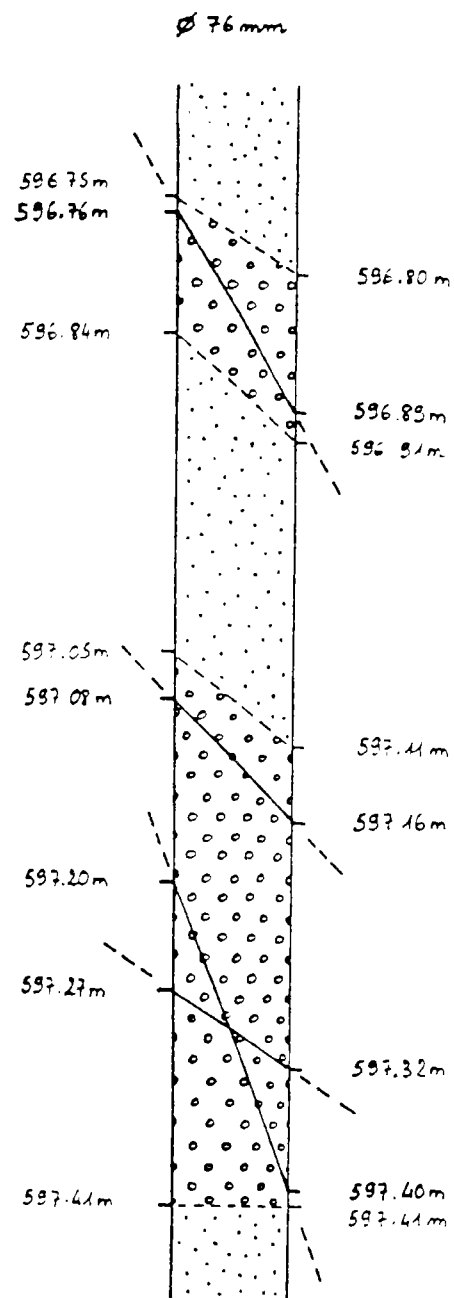


FIG.19

- donner une teinte dominante rose ou rouge à la roche.
- 100 627.50 - 635.00 m Granite ayant une texture intermédiaire entre grenue et microgrenue. Nombreux phénocristaux teinte chair 475. Plagioclases blancs, rose orangé soutenu 1555, teinte chair 472, 473, rubéfiés marron clair 4655, marron rose 4715, 4695 et marron foncé 476, 477. Les fractures sont à remplissage argileux compact vert avec décoloration des minéraux à leurs abords. Fractures : 628.70 m ; 629.65 m ; 630.05 m ; 640.50 m ; 630.90 m ; 631.10 m ; 632.00 m ; 632.20 m ; 633.71 m ; 633.01 m ; 634.70 m. Courtes passées où le fond de la roche est rouge délavé.
- 101 635.00 - 646.50 m Granite très fracturé, de même texture qu'en 100. Tous les feldspaths sont roses. Le fond forme une sorte de "bouillie" teinte chair 473 et rose orangé soutenu 1555. Plagioclases rubéfiés marron rose 4705. Rares phénocristaux marron chair 4685. 644.40 - 636.50 m : phénocristaux blancs et peu nombreux. 644.80 - 645.20 m : fracture.
- 102 646.50 - 660.70 m Granite microgrenu à fond teinte chair 472 à rose orangé soutenu 1555. 646.50 - 650.00 m : fracturation subverticale importante. Plagioclases rubéfiés marron rose 4705 en grand nombre conférant à la roche une dominante rouge foncé. Plagioclases rose pâle orangé 156 et teinte chair 473. 650.45 - 651.15 m : granite foncé à forte concentration en biotites. Traces de micas dans les fractures à remplissage gris "warm gray 1 C".
- 103 660.70 - 663.20 m Retour à un granite assez finement grenu. Plagioclases rose pâle et rubéfiés marron sont en proportions égales.
- 104 663.20 - 673.00 m Granite du type 113 plus grenu. 669.60 - 670.15 m : passées où l'on observe une concentration de biotites. Fracturation assez intense : 4 à 5 fractures par mètre en moyenne. Il s'agit, en majorité, de fracture 60° à remplissage de calcite. Roche à fond rose, altérée dans son ensemble. Présence d'une famille de fractures 45°.
- 105 673.00 - 678.00 m Zone hyperfracturée, voire broyée. Tous les minéraux sont roses. Fond rose pâle orangé 162 et rose orangé soutenu 1625 par endroit. Plagioclases rubéfiés marron rose 4705. Fracturation 60° à subverticale à remplissage vert 457, 458, et calcite. On se rapproche par endroit de la texture cataclasée.

- 106 678.00 - 681.80 m Granite de teinte dominante rose orangé. Les phénocristaux de feldspath potassique sont rose orangé soutenu, bien plus pâles que le fond.
679.19 - 679.54 m : fracture subverticale avec remplissage de calcite (cf. fig. 20).
Fracturation : 5 fracture/mètre.
- 107 681.80 - 686.50 m Granite cataclasé ayant parfois l'aspect d'une "bouillie" rosâtre.
a) 681.35 - 682.35 m : fond uni rose pâle orangé 162 affecté par des filonnets de quartz.
682.35 - 683.05 m : fracture importante. Remplissage : silice amorphe.
b) 683.05 - 686.00 m : "bouillie" verdâtre avec fracturation 30° tous les 5 cm.
c) 686.00 - 686.30 m : "bouillie" noire 418. Présence de quelques minéraux rose orangé soutenu 1565 aux contours mal définis.
d) 686.23 - 686.50 m : même aspect qu'en 117 c avec la présence supplémentaire de gros minéraux plus ou moins automorphes et trapus rose orangé.
- 108 686.50 - 697.80 m Granite grenu très fissuré (fissuration colmatée). La roche présente un aspect marbré. Fond à dominante rose pâle, teinte chair à rose orangé soutenu. Fracturation 60° : 6 à 7 fractures/mètre. Marbrures à remplissage vert sombre. Vers 686.50 m, traces de couleur rouille dans les fissures.
- 109 697.80 - 700.65 m "Bouillie" marron clair 4645 à verdâtre 5625, fracturation moins intense que précédemment : 4 à 5 fractures/mètre.
- 110 700.65 - 735.10 m Granite altéré. "Bouillie" à dominante gris marron "warm gray 10C". des zonations de couleur sont cependant discernables (cf. fig. 21, 22 et 23).
- 111 735.10 - 740.75 m Granite microgrenu assez peu fracturé. Peu de phénocristaux. On observe des regroupements de biotites qui toutefois ne forment pas d'amas compacts. Quelques plagioclases marron rubéfiés. Le fond de la roche est pâle.
- 112 740.75 - 745.60 m Granite du type 110. Nombreuses fissures colmatées subverticales gis vert pâle. Absence de plagioclases rubéfiés marron.
- 113 745.60 - 748.80 m Granite où dominant les phénocristaux rose pâle et teinte chair qui confèrent une teinte pâle à l'ensemble de la roche. Plagioclases rubéfiés rouge orangé à l'aspect altéré. Fissures subverticales et subhorizontales à remplissage incomplet laissant des vacuoles avec traces d'oxyde de fer marron.
784.00 - 748.80 m : grande fissure colmatée subverticale à remplissage de calcite de 1 cm d'épaisseur. Présence de plagioclases rose orangé soutenu là où la fissure est la plus épaisse. Grande concentration de ces plagioclases altérés vers 748.80 m.

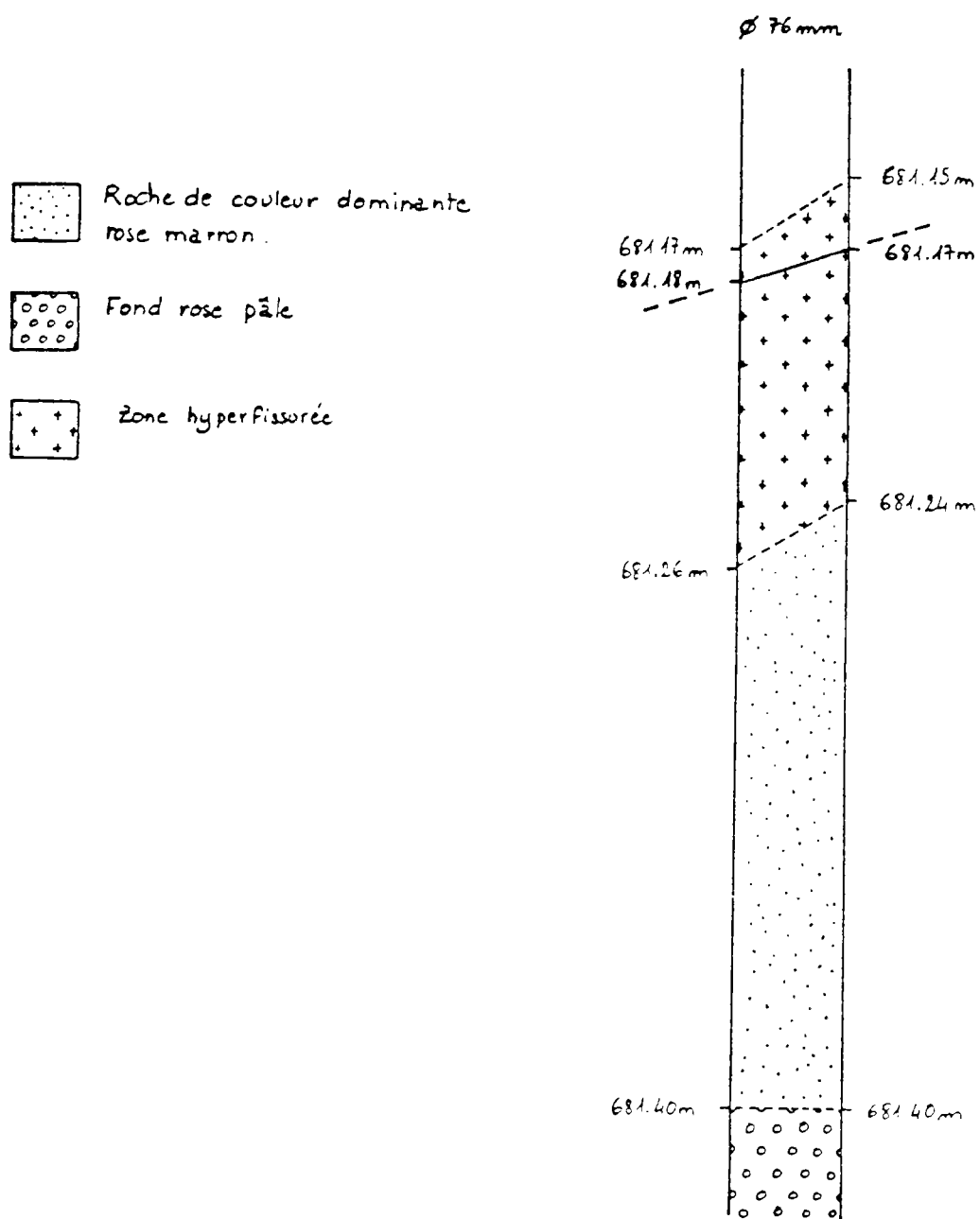
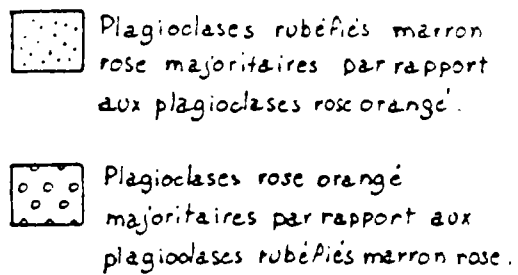


FIG.20

- 
- Plagioclases rubéfiés marron rose majoritaires par rapport aux plagioclases rose orangé.
 - Plagioclases rose orangé majoritaires par rapport aux plagioclases rubéfiés marron rose.

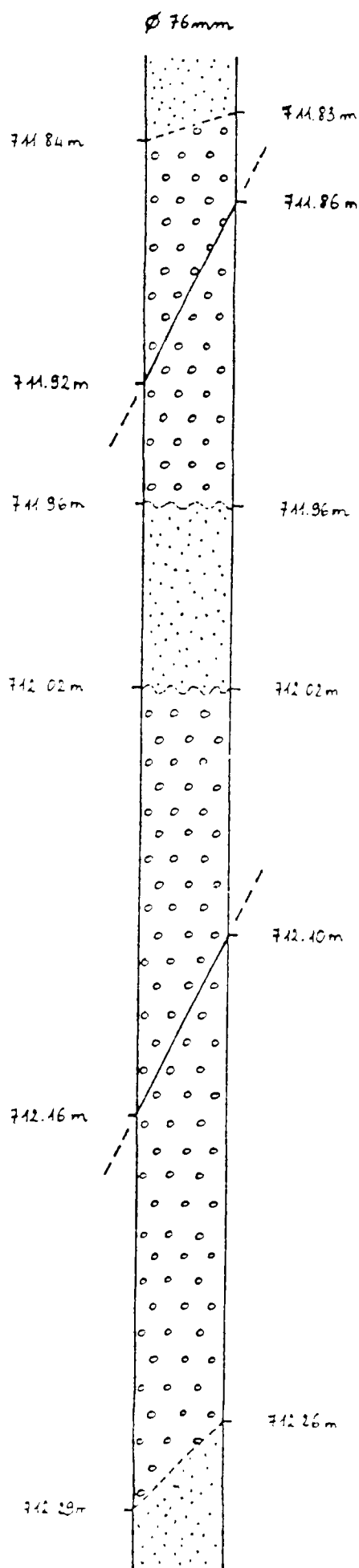


FIG.21

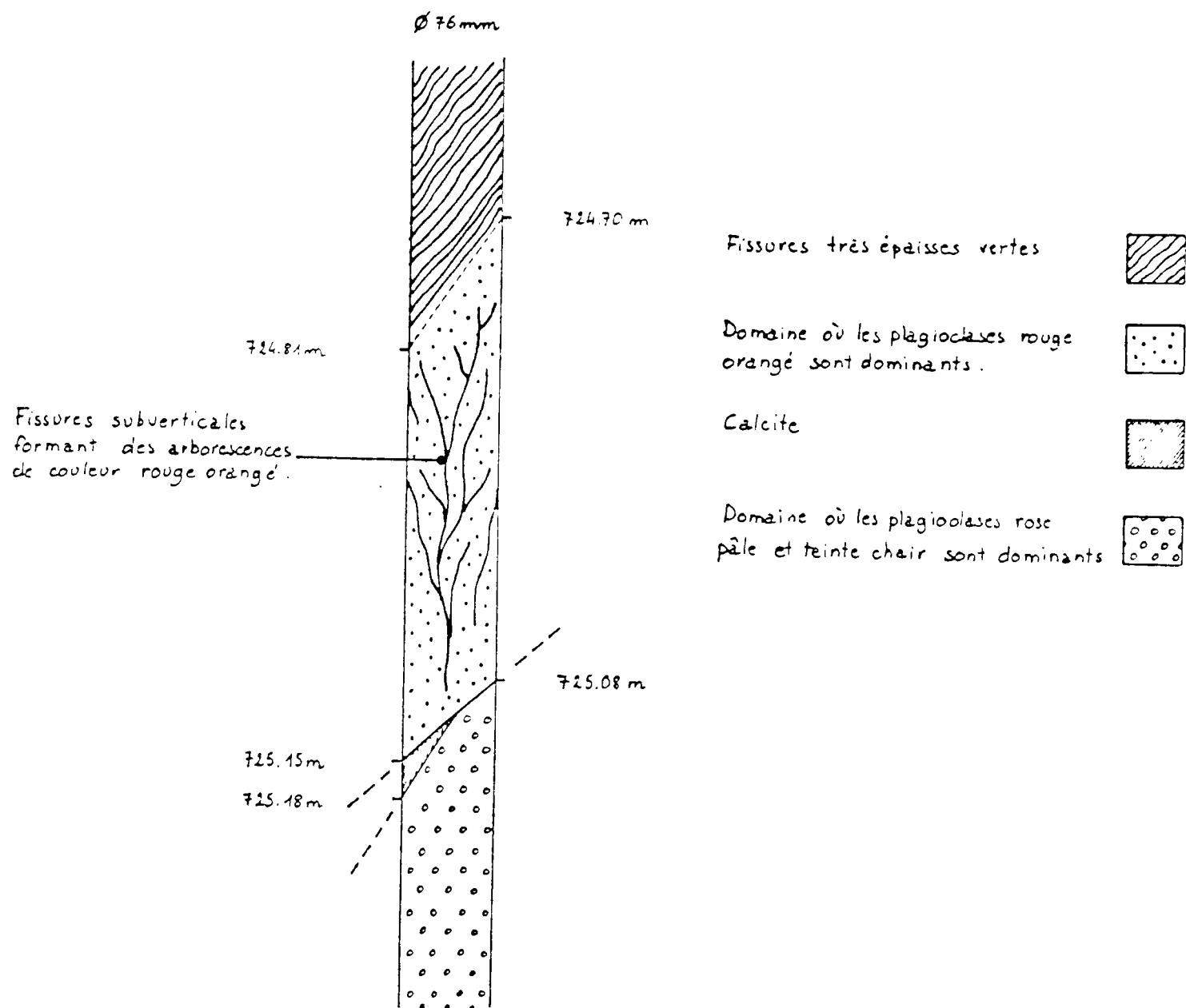





FIG. 22

 Domaine où les plagioclases rubéfiés marrons dominant et les phénocristaux de feldspath potassique sont blancs.

 Domaine où les plagioclases rouge orangé dominant et les phénocristaux de feldspath potassique sont rose pâle.

 Domaine où les plagioclases rose pâle et teinte chair dominant.

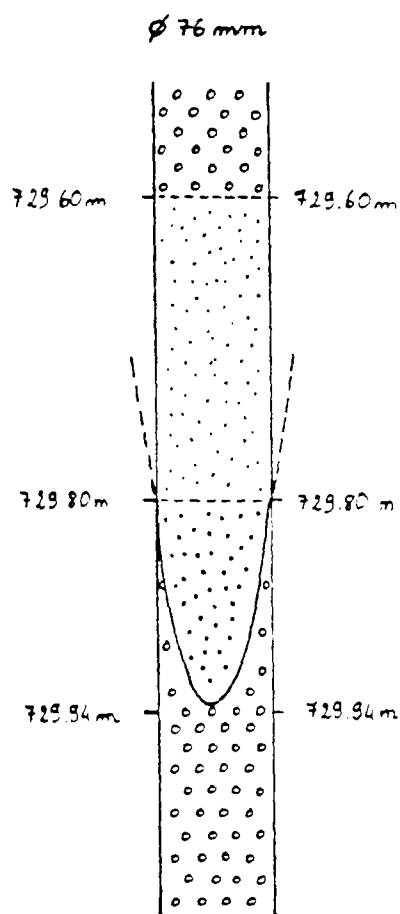




FIG.23

- 114 748.80 - 750.40 m Granite du type 110.
749.40 m : fracture 60° avec remplissage de calcite vacuolée.
748.50 - 749.00 m : faciès microgrenu. "Bouillie" marron rose 4715, 4725. Plagioclases rose orangé soutenu 1555, teinte chair 475 et marron rose rubéfié 498 (cf.fig.24).
- 115 753.50 - 755.90 m Granite grenu de couleur dominante rouge orangé. Large fissure de calcite de 2 cm d'épaisseur de 754.50 à 754.70 m doublée vers le haut de fissures colmatées vertes tenues sur 2 cm et, vers le bas, de "bouillie" rouge sur 2 cm.
755.42 - 755.97 : large fracture subverticale dont les bords sont constitués de quartz et le centre de calcite.
755.90 - 757.75 m : - LACUNE -
- 116 757.75 - 758.60 m Granite grenu rubéfié de teinte rose dominante. Orientation grossière à 60° des phénocristaux de feldspath potassique (cf.fig.25).
- 117 758.60 - 761.00 m Nombreuses lacunes dans les carottes correspondant à cette profondeur. Fissuration colmatée 60° intense formant des marbrures de teinte rouille, entourées de plagioclases orangés. Phénocristaux teinte chair 472 et marron clair 4665.
760.70 - 761.00 : nombreuses fractures subhorizontales découpant la roche en tranches de 2 à 7 cm d'épaisseur.
Traces de calcite dans les fractures dont le remplissage vacuolé est vert 5865.
759.30 - 760.70 m : zone cataclasée.
- 118 761.00 - 784.00 m Intervalle assez important où il est difficile de noter des différences sensibles de faciès : la roche est altérée de manière uniforme. La roche est grenue à phénocristaux gris 435 à marron clair 4665 (notamment au niveau des zonations). Nombreux plagioclases marron clair 1675 de petite taille.
Passées où les plagioclases orange 1595 se substituent aux plagioclase marron clair 1675, particulièrement au voisinage des fractures.
Fissures colmatées marron clair 139 vers 784.00 m.
- 119 789.00 - 792.67 m Granite contrastant avec la zone précédente. La roche est rose pâle avec des nuances orangées. La fracturation est subverticale avec un remplissage contenant de la calcite. Présence fréquente de vacuoles de taille millimétrique au niveau des fractures.
Fin de ce faciès délimitée par la fracture : 792.54 - 792.67 m.

 Granite microgranu marron
rose 4715, 4725.

 Plagioclases rose orangé
soutenu 1SSS dominants.

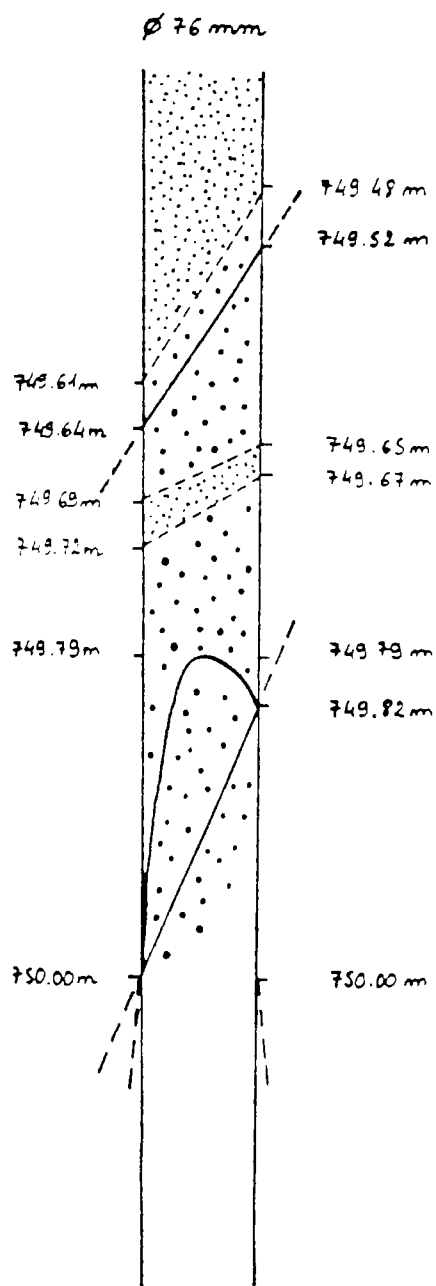


FIG.24



Plagioclases rubéfiés marron rose dominants.



Plagioclases rubéfiés rouge orangé dominants.



Plagioclases rose pâle et teinte chair dominants.



Fissure dont les bords sont constitués de quartz et le centre de calcite.

758.37

758.40 m

758.43 m

758.52 m

758.54 m

Ø 76 mm

758.43 m

758.46 m

758.48 m

758.62 m

758.66 m

758.72 m

Fracture d'épaisseur inférieure à 1 mm

FIG. 25

- 120 792.67 - 792.95 m Granite contrastant avec la zone précédente. Les phénocristaux de feldspath potassique sont plus clairs. Présence de nombreux plagioclases marron rose.
- 121 792.95 - 795.28 m Granite à nouveau très fracturé mais son aspect est bien différent du granite 119. Ici, le fond est rose pâle. Très peu de phénocristaux, ou alors petits et rose pâle. Les grains de quartz gris contrastent avec les autres minéraux contrairement au granite 119 où ils sont si pâles qu'ils se fondent avec les autres minéraux.
Pas de zonation autour des fractures (cf.fig.26).
- 122 795.28 - 798.50 m (cf.fig.27).
798.15 - 798.50 m : - LACUNE -
- 123 798.50 - 801.65 m Continuation de la fracture subverticale représentée sur la figure 27, jusqu'à 800.74 m.
a) 798.50 - 799.00 m : les phénocristaux disparaissent et la roche prend une teinte "rouge sale".
b) 799.00 - 800.30 m : granite légèrement plus clair qu'en 123 a.
c) 800.30 - 801.35 m : la roche est hachée par une multitude de fissures colmatée 60° formant des marbrures contenant de la calcite. Plagioclases rose orangé pâle et teinte chair.
801.35 - 801.65 : - LACUNE -
- 124 801.65 - 803.70 m Granite de couleur rouge orangé contenant des phénocristaux de feldspath potassique blancs. Fissuration colmatée 60° et fracturation subverticale à remplissage de calcite. Nombreux plagioclases rubéfiés marron dans les domaines les plus éloignés des fractures (cf.fig.28).
- 125 803.70 - 815.30 m Granite grenu à phénocristaux blancs, relativement peu fracturé (cf.fig.29 et 30).
- 126 815.30 - 820.40 m Passée où la concentration des plagioclases rouge orangé est importante.
Il est difficile d'observer une variation de couleur autour des fractures. Mise à part sa coloration, la roche a un aspect relativement sain.
816.00 - 818.00 m : - LACUNE -
- 127 820.40 - 821.00 m Séquence d'altération autour de la fracture 820.60 - 820.88 m à remplissage de calcite. Nombreuses fissures colmatées vert foncé formant des arborescences. Les plagioclases ont une couleur rouge orangé aux abords de la fracture, et marron au delà (cf.fig.31).
- 128 821.00 - 830.85 m Granite caractérisé par la présence de plagioclases rouge orangé à rouge sang. Fracturation 60° intense.

Fractures à remplissage vert
contenant de la calcite.

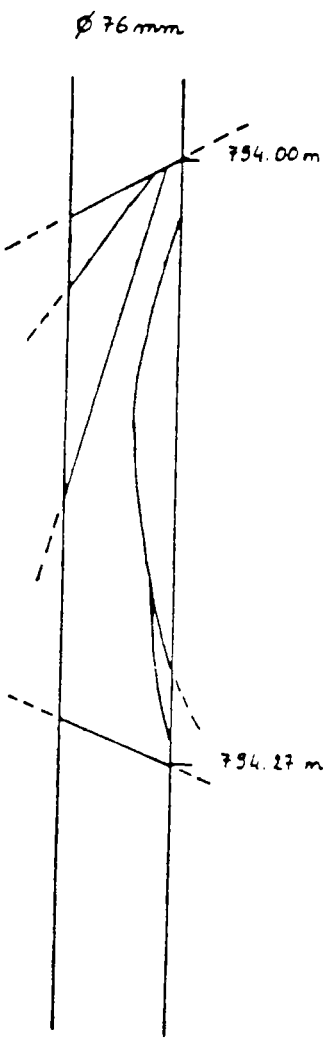
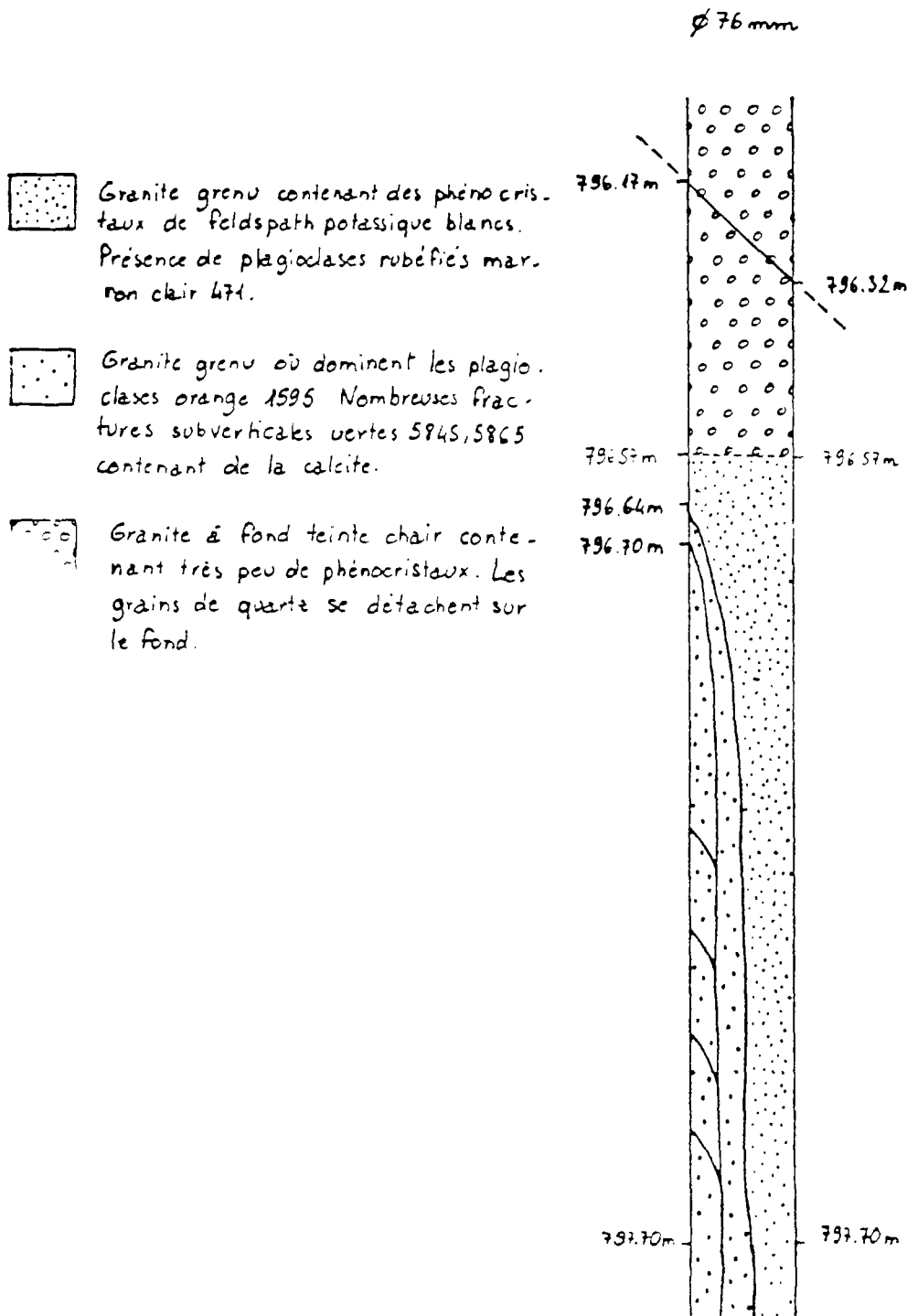




FIG.26

FIG.27



 Granite où dominant les plagioclases blancs et teinte chair.

 Granite où dominant les plagioclases rouges.

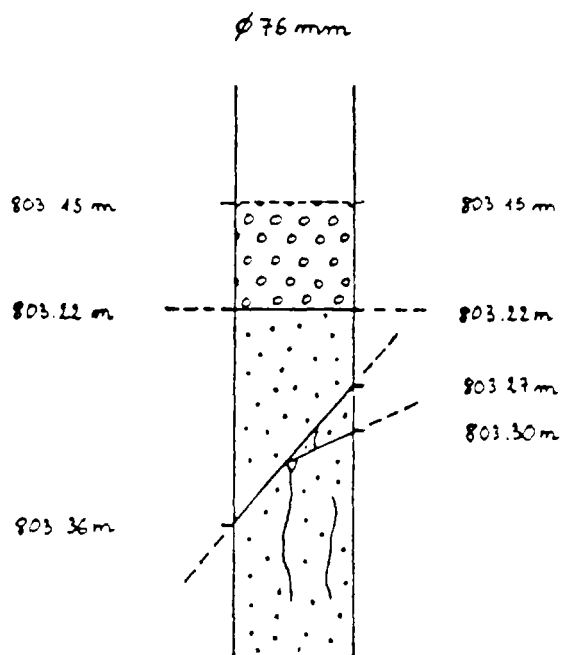





FIG.28

-  Granite à fond gris, où dominant les Plagioclases rubéfiés marrons.
-  Granite où dominant les plagioclases rubéfiés rouge orangé
-  Granite où dominant les plagioclases blancs, rose orangé pâle et teint chair.

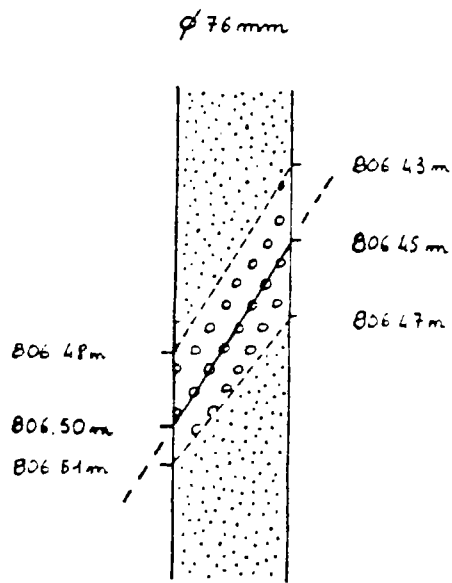


FIG.29

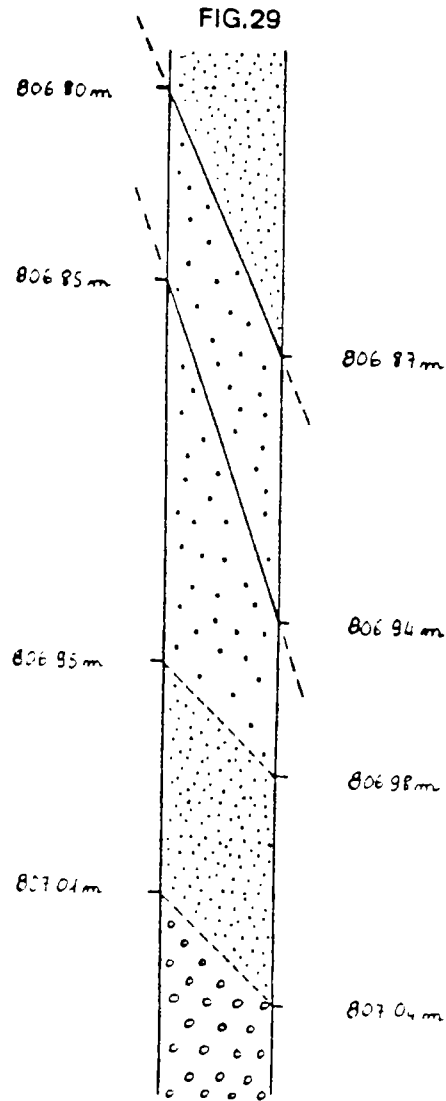




FIG.30

-  Granite à fond gris et plagioclases rubéfiés marrons.
-  Granite à plagioclases rouge orangé

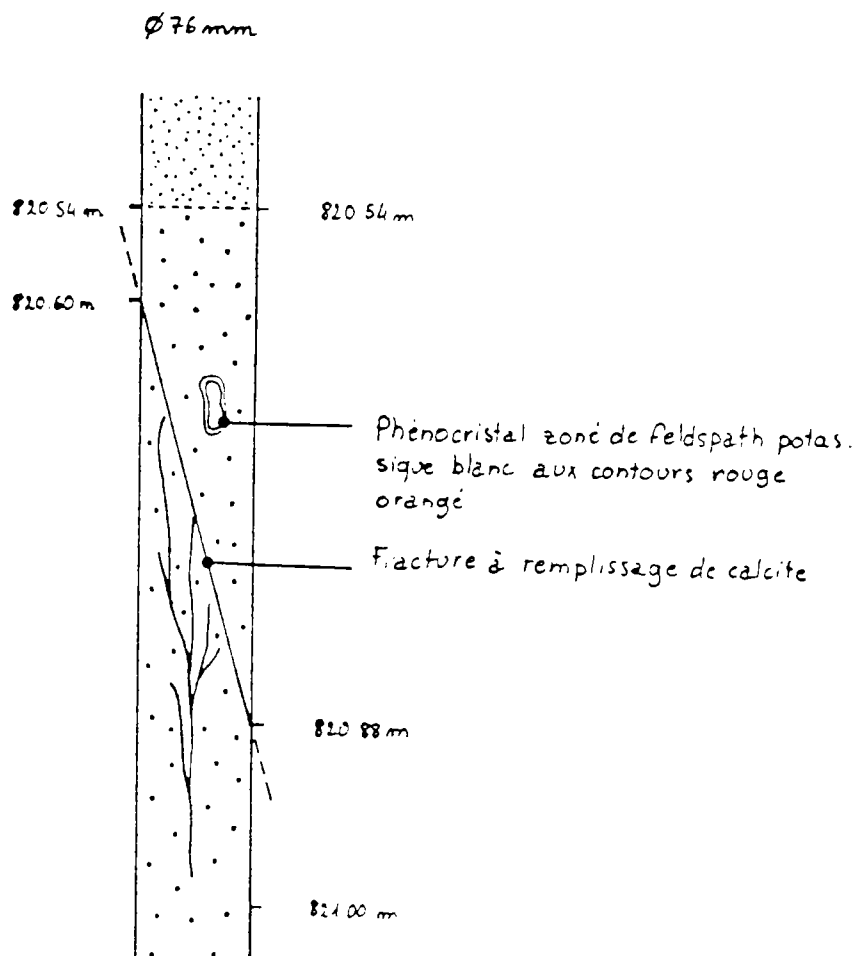


FIG. 31

a) 821.40 - 821.70 m : nombreux plagioclases rose orangé pâle et teinte chair au contact des fractures.

821.56 - 821.70 m: fracture à remplissage vert foncé de 5 à 7 mm d'épaisseur, ne réagissant pas à HCl 0.1 N.

b) 821.90 - 824.25 m : zone assez homogène à phénocristaux blancs et plagioclases rubéfiés marron rose.

(cf.fig.32)

c) 824.25 - 825.00 m : domaine homogène du type 128 b avec des passées riches en plagioclases rubéfiés rose pâle et teinte chair autour des fissures 60°.

La localisation de ces plagioclases est limitée à une bande de 1 cm au contact des fissures.

d) 825.00 - 830.85 m : nombreuses figures d'altération autour des fractures.

(cf.fig.33, 34 et 35)

La dominante rouge de la roche disparaît autour des fractures (cf.fig.36).

129 830.85 - 832.70 m Domaine parcouru par une fracture subverticale à remplissage vert foncé à noir et présentant de petites plaques de calcite.

Fissuration colmatée subverticale intense accompagnée de plagioclases rose et rouge orangé.

130 832.70 - 835.60 m a) 832.70 m : cumulat de biotites (bordure figée) de 10 cm d'épaisseur.

b) 833.00 m : terminaison d'une fracture 60° accompagnée de plagioclases blancs.

c) 833.10 m : bordure figée du type 130 a).

d) 833.65 - 834.30 m : granite finement grenu comprenant des plagioclases pâle et blancs. Absence de phénocristaux de feldspath potassique.

e) 834.30 - 835.45 m : granite pratiquement sain, à plagioclases rose pâle. Petits points rouges dans les plagioclases rose pâle.

131 835.60 - 844.60 m Granite finement grenu à phénocristaux de feldspath potassique blancs. Nombreuses fractures subhorizontales.

838.74 - 838.98 m : enclave sombre : bouillie sombre.

839.21 - 839.41 m : fracture entourée de plagioclases rouges rubéfiés. Fissures 45° noires entourées de plagioclases blancs.

Passée fissurée.

(cf.fig.37, 38, 39 & 40).

132 844.60 - 846.23 m Domaine subissant la double influence des fracturations 60° et subverticales.



Fissuration formant des arborescences (cf.fig.41).

133 846.23 - 853.10 m Granite très altéré (cf.fig.42).

850.59 - 850.80 m : fracture à remplissage vert et contenant des plaques blanches de calcite.

852.43 - 852.51 m : fracture surmontée de plagioclases rose pâle et teinte chair.

Jusqu'à 853.10 m : granite globalement sain.

-  Granite où dominant les plagioclases rubéfiés marrons.
-  Granite où dominant les plagioclases rubéfiés rouge orange.

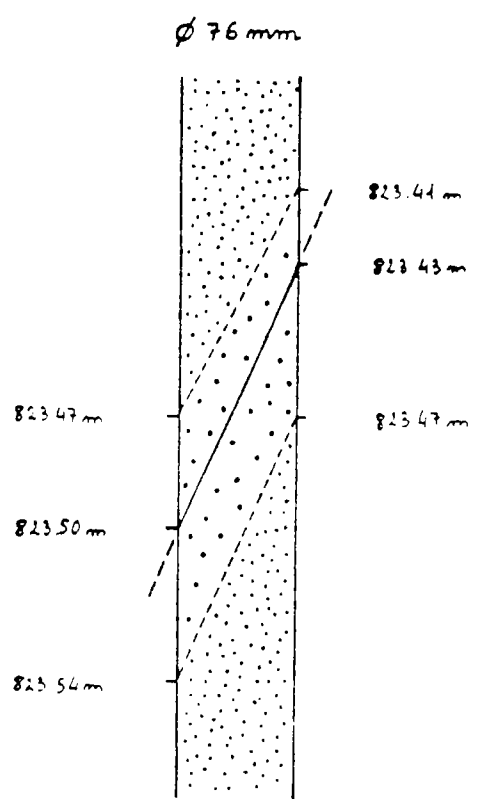


FIG.32

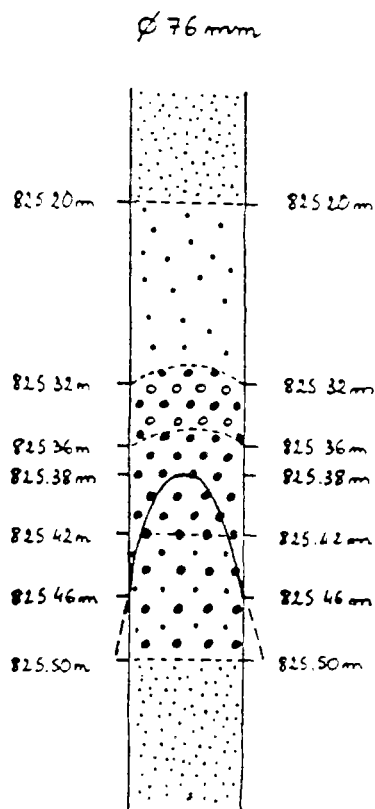


FIG.33

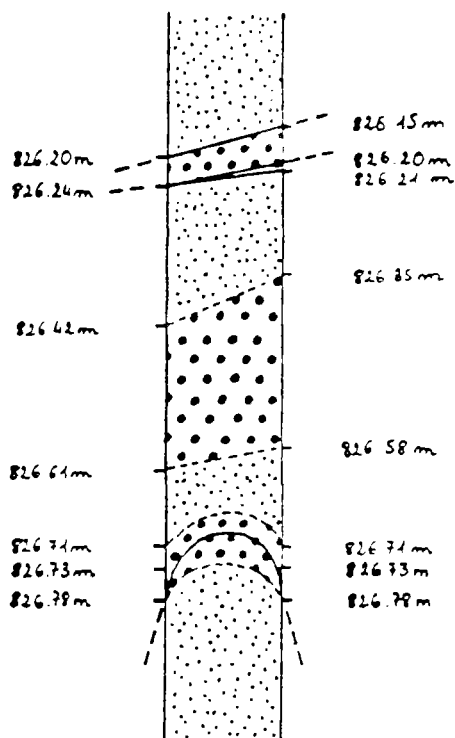


FIG.34

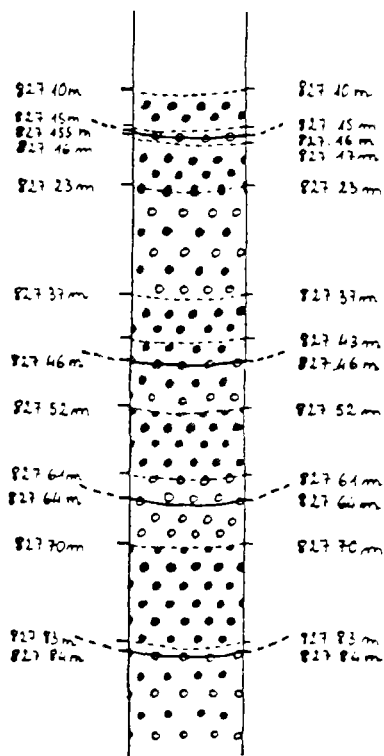


FIG.35



Granite à fond gris, phénocristaux blancs et plagioclases rubéfiés marrons.



Granite à plagioclases rouge "sang"



Granite à plagioclases rose pâle, teinte chair et plagioclases rubéfiés rouge orangé.



Granite à plagioclases rose pâle et teinte chair.



Granite à plagioclases rubéfiés rouge "sang" et plagioclases rouge orangé.

Les fractures ont un remplissage de calcite.



Granite à plagioclases rose pâle et teinte chair.



Granite à phénocristaux blancs et plagioclases rubéfiés rouge sang.

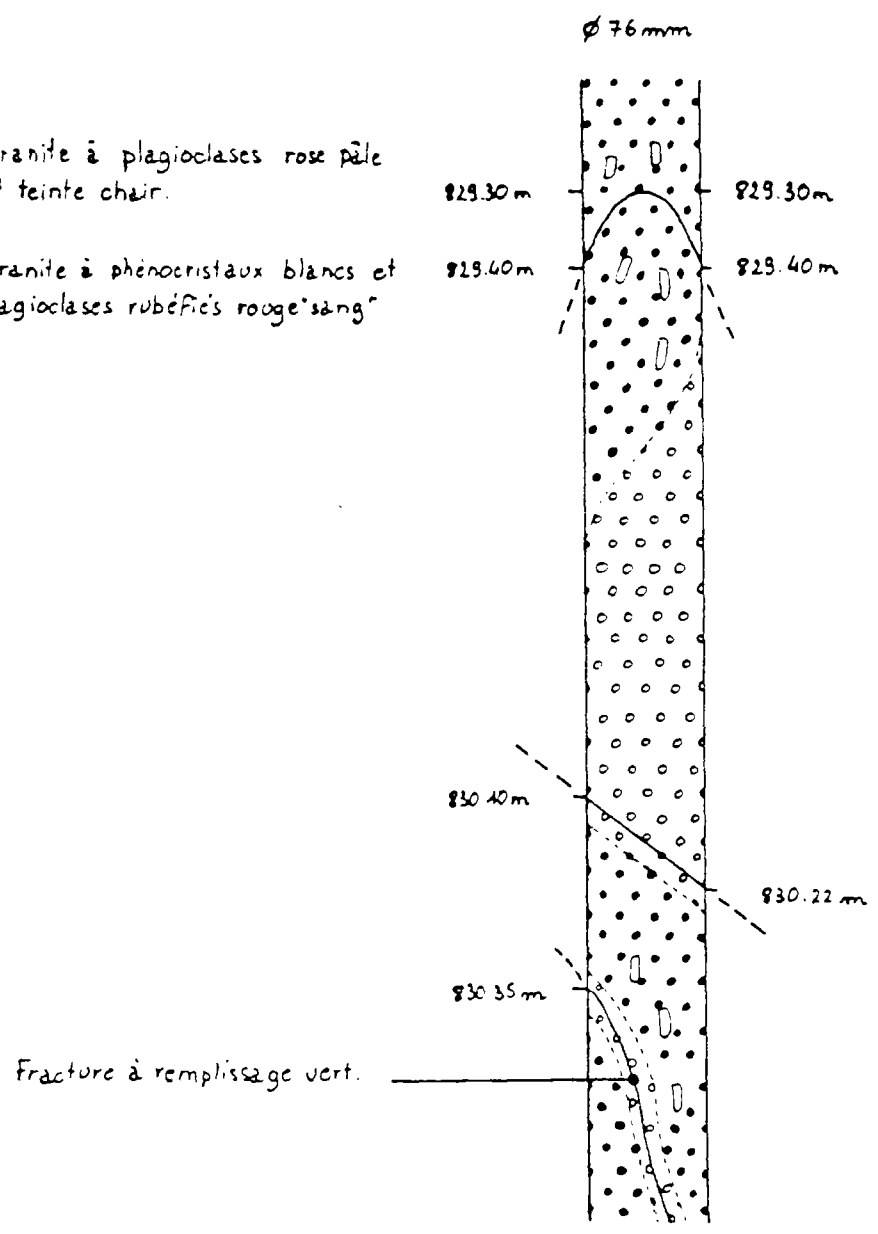






FIG.36

-  Granite à plagioclases rubéfiés marron rose.
-  Granite à plagioclases rose pâle et teinte chair.
-  Enclave sombre ("bouillie" noire verdâtre)
-  Granite globalement sain

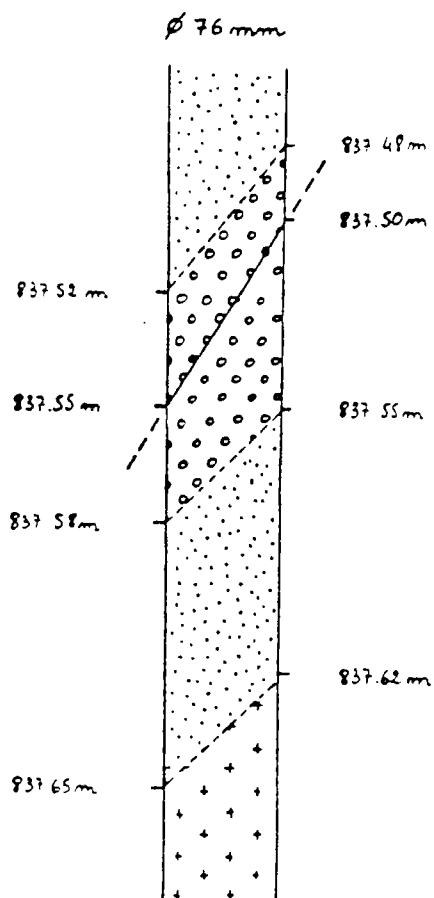


FIG.37

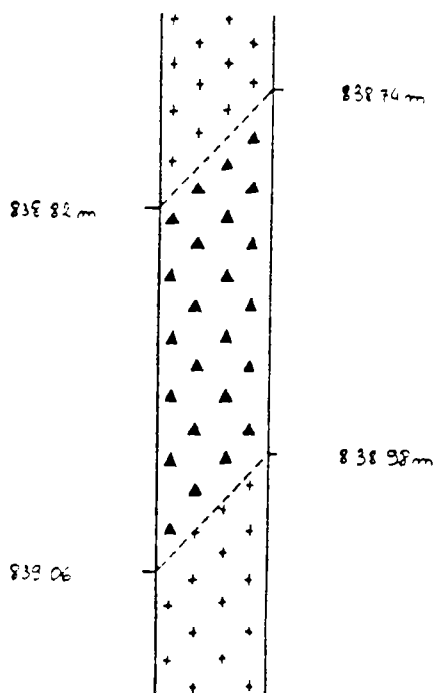





FIG.38

-  Granite à plagioclases rubéfiés marron rose.
-  Granite à plagioclases rose pâle et teinte clair.
-  Granite globalement sain.

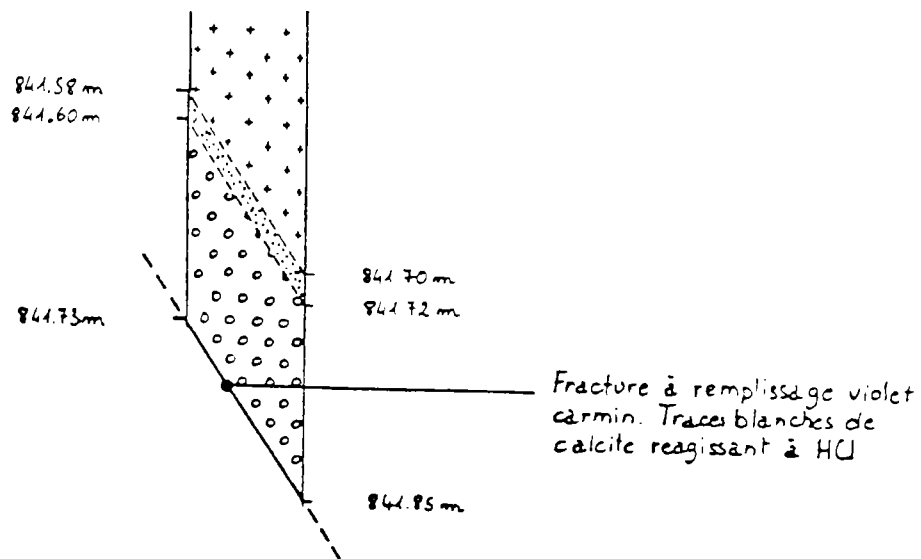


FIG.39

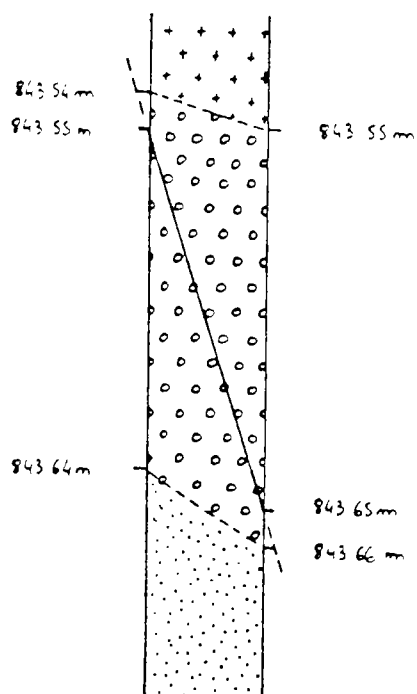






FIG.40

-  Prédominance des plagioclases blancs.
-  Granite globalement sain.
-  Granite à plagioclases rubéfiés rouges.
-  Granite à plagioclases rubéfiés marron rose dominants.

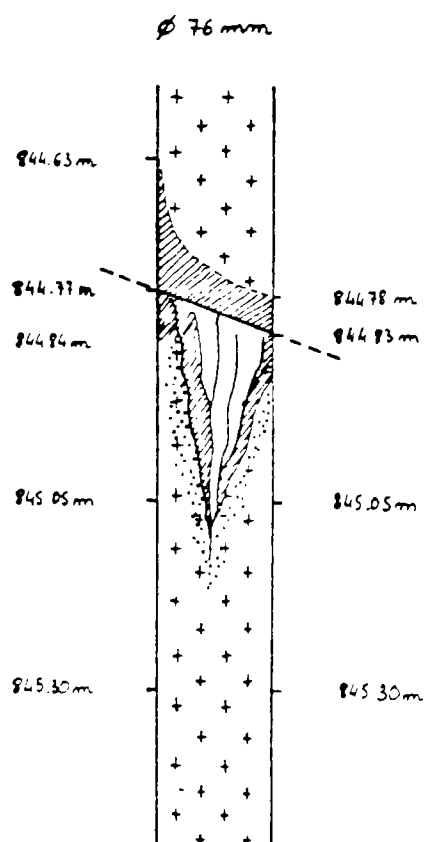


FIG.41

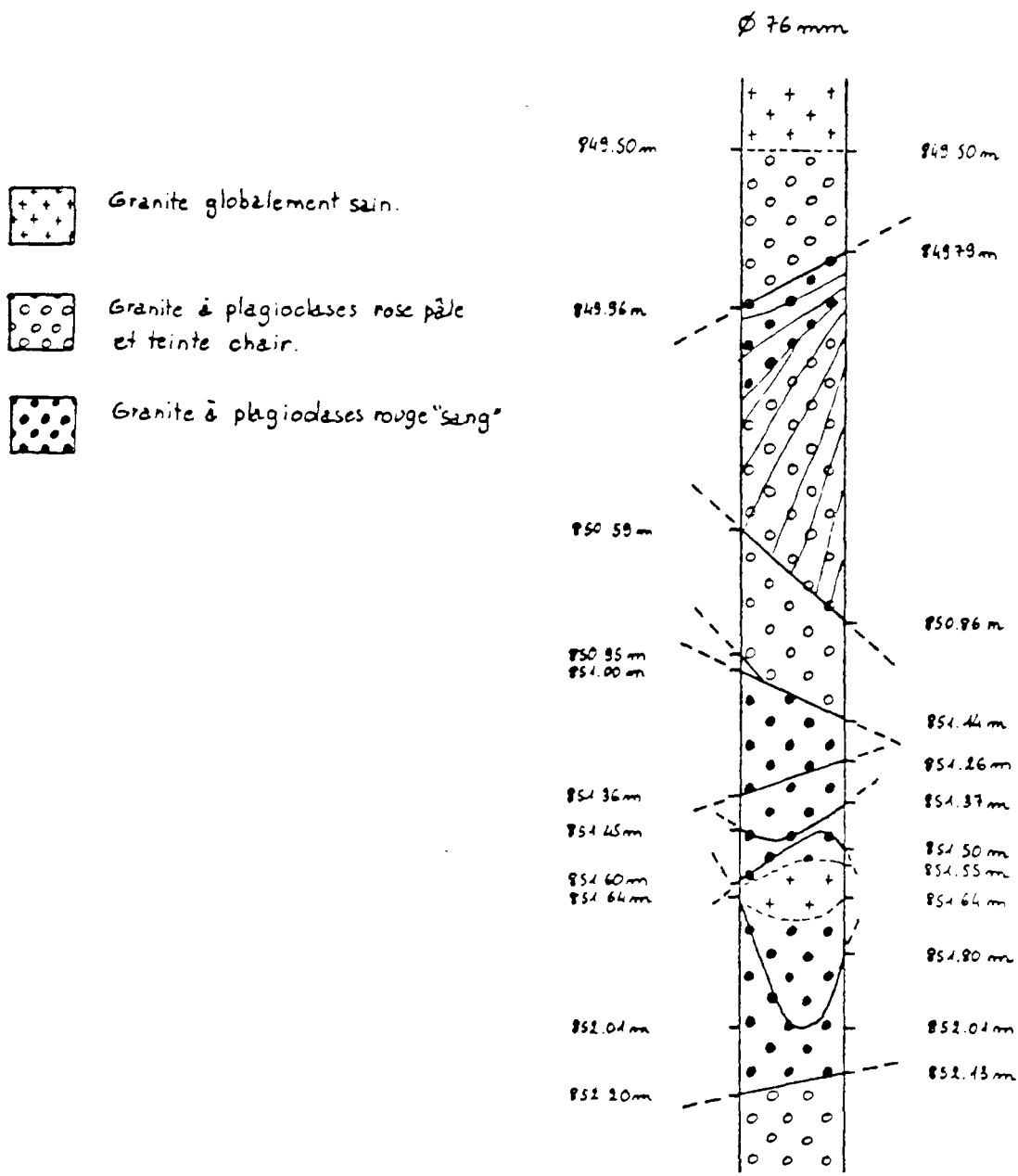





FIG.42

- 134 853.10 - 860.00 m Granite où la majorité des plagioclases rubéfiés sont rouge "sang". Les phénocristaux de feldspath potassique sont blancs mais peuvent avoir des inclusions rouges. De nombreux plagioclases rubéfiés rouge "sang" peuvent avoir leur centre blanc.
853.10 - 854.44 m : granite hyperfissuré vert foncé.
Les fissures sont colmatées, verticales et forment des arborescences.
854.44 - 854.87 m : roche sous forme de "bouillie" rouge rouge 479 et orangé soutenu 1625.
854.87 - 855.20 m : granite où les plagioclases sont rouge "sang".
855.06 - 855.12 m : fracture vert foncé à remplissage de calcite.
855.20 - 857.00 m : plagioclases rubéfiés rouge "sang" en grand nombre autour des fractures (cf. fig. 43).
- 135 860.00 - 878.00 m Granite gris sain finement grenu.
Phénocristaux zonés de feldspath potassique marron clair 4675, 4685. Plagioclases teinte chair 479. La roche est parsemée de points rouges 500. Quartz gris 423.
873.00 - 873.45 m : filons subverticaux de biotites vert 5773 et gris 416.
- 136 878.00 - 878.70 m Granite sain à phénocristaux marron clair 4685. Fissure colmatée subverticale à biotites avec plagioclases rose pâle et teinte chair à proximité.
- 137 878.70 - 882.45 m Granite moyennement altéré. Fissuration colmatée entourée de plagioclases rose pâle et teinte chair. Fracture vert foncé subverticale vers 881.00 m.
- 138 882.45 - 886.03 m Fissuration resoudée formant des arborescences. Plagioclases rose orangé au voisinage de ces fissures.
Fissuration colmatée 60° et subverticale de couleur verte avec calcite.
- 139 886.03 - 888.32 m Granite globalement sain.
- 140 888.32 - 892.30 m Granite globalement sain. Fracturation accompagnée des plagioclases rubéfiés rouge orangé.
889.70 - 889.90 m ; 890.10 - 890.20 m : fractures à remplissage vert et contenant de la calcite.
Nombreuses fissures colmatées subverticales parallèles entre les deux fractures.
- 141 892.30 - 895.58 m Granite hyperfracturé et fissuré. Fracturation 60° et subverticale à remplissage vert contenant de la calcite. Plagioclases rubéfiés rouges sur cet intervalle.

-  Granite globalement sain.
-  Granite à plagioclases rose pâle et teinte chair
-  Granite à plagioclases rubéfiés rouge "sang".

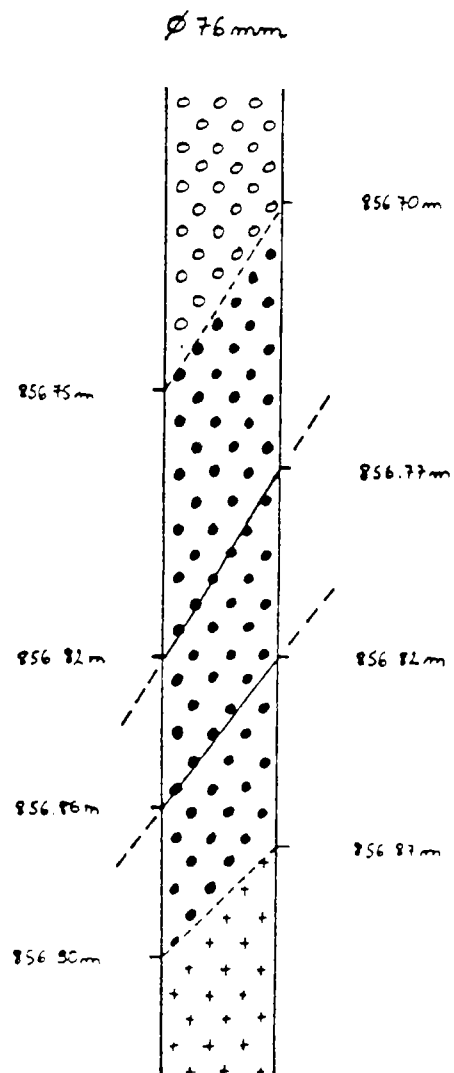


FIG.43

- 142 895.58 - 897.00 m Granite du type 141 avec prédominance des plagioclases rose clair et teinte chair.
- 143 897.00 - 899.40 m Granite du type 141 avec prédominance des plagioclases blancs.
897.40 - 899.40 m : - LACUNE -
- 144 899.40 - 899.85 m Granite grenu gris et blanc. Phénocristaux rose pâle orangé. Fissures colmatées subhorizontales et 45° à remplissage vert.
- 145 899.85 - 904.45 m Zone extrêmement ponctionnée. Il ne reste que quelques débris d'échantillons de couleur rouge "sang"(jusqu'à 903.41 m).
903.41 - 904.45 m : Granite rouge "sang". Fissuration colmatée intense subverticale.
904.00 - 904.25 m : fracture subverticale à remplissage vert contenant de la calcite, d'épaisseur de 2 à 3 cm. Jusqu'à 904.40 m, roche rouge d'un côté et granite pratiquement sain de l'autre.
- 146 904.45 - 905.45 m Granite à peu près sain, grenu, traversé d'une longue fissure colmatée subverticale entourée de plagioclase rose pâle et teinte chair plutôt que de plagioclases rubéfiés rouge "sang".
- 147 905.45 - 909.00 m Granite globalement sain.
Fissure subverticale vert 4495, 4525. Phénocristaux teinte chair 473. Plagioclases rouges 171, oranges 1595, rose orangé soutenu 1555, 1575. Plagioclases blancs au contact des fissures.
(cf. fig. 44).
- 148 909.00 - 909.47 m Fractures avec remplissage vert de 5 à 6 mm d'épaisseur accompagnées de fissures colmatées parallèles.
Plagioclases blancs et rose pâle au contact des fissures. Les phénocristaux sont blancs.
- 149 909.47 - 927.80 m Répétition de la séquence décrite en 148.
Très peu de grosses fractures, bon nombre de carottes étant du même tenant.
A noter quelques couches riches en biotites de quelques centimètres d'épaisseur à 922.80 m et 10 cm à 912.00 m. Autour de ces couches à biotites se concentrent des plagioclases teinte chair 472, 473 sur 3 cm. Phénocristaux teinte chair 475. Quelques plagioclases rubéfiés marron rose 488.
- 150 927.80 - 935.00 m Granite gris sain avec quelques passées altérées.
929.00 m : fracturation subhorizontale surmontée de plagioclases blancs et teinte chair sur 2 cm.
931.90 - 932.00 m : fissure colmatée à biotites. Plagioclases rose pâle orangé 162 et marron clair 4645.
10 cm de part et d'autre des lèvres de la fracture.



Granite globalement sain



Granite à plagioclases rubéfiés
"rouge sang"



Granite à plagioclases blancs

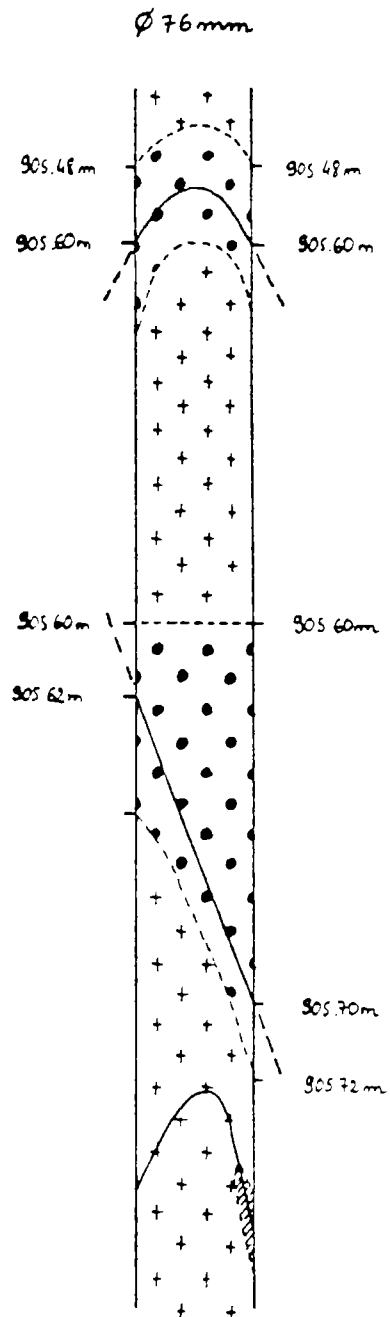





FIG. 44

- 151 935.00 - 937.00 m Granite très fissuré subverticalement. Plagioclases rouge orangé et rose pâle orangé autour des fissures subverticales qui forment des arborescences. Phénocristaux de feldspath potassique rose pâle.
- 152 937.00 - 945.15 m Granite sain.
943.45 - 943.78 m : fracture à remplissage de calcite.
Plagioclases rouge orangé vers le bas jusqu'à 943.83 m.
- 153 945.15 - 946.55 m Granite de couleur dominante rouge orange vif.
945.16 - 945.30 m : fracture entourée de plagioclases rubéfiés rouge "sanglant" 164, 166, 167, 159, 171.
945.50 - 945.60 m : fracture subverticale.
Fissuration importante à remplissage de calcite.
- 154 946.55 - 948.50 m Granite finement grenu, peu rubéfié.
946.55 - 948.60 m : enclave sombre.
946.60 - 949.00 m ; 949.00 - 951.15 m : fractures à remplissage de calcite. Ces fractures sont entourées de plagioclases blancs et rose pâle, teinte chair.
- 155 952.15 - 954.15 m - LACUNE -
- 156 954.15 - 969.66 m Granite sain.
Phénocristaux de feldspath potassique marron clair 468, 4675. Quartz gris 423. Plagioclases rubéfiés violet carmin 4995.
- 157 969.66 - 974.10 m Granite globalement sain , altéré au niveau des fractures.
a) 969.66 - 973.20 m : cf. fig. 45.
b) 973.20 - 973.60 m : fissuration colmatée formant des arborescences entourées de plagioclases blancs et rose pâle puis rouge orange.
c) 973.60 - 974.10 m : granite parfaitement sain.
- 158 974.10 - 979.15 m Intervalle très ponctionné. Il ne reste plus que quelques débris : morceaux de roche très sombre, sorte de "bouillie" contenant de gros minéraux rouges. Fracture subverticale avec remplissage de calcite d'épaisseur de 4 à 5 mm. Morceaux de roche affectées par des fissures formant des arborescences.
- 159 979.15 - 982.20 m Granite parfaitement sain contenant des phénocristaux aux contours flous.
- 160 982.20 - 985.88 m Granite très rubéfié et très fissuré.
Phénocristaux de feldspath potassique marron clair 4685. Fractures noires ou bleues 5487, 5497. Plagioclases rubéfiés rose orangé soutenu 1555 et rose pâle orangé 162. Plagioclases marron clair 471 et marron rose 4715.
- 161 985.88 - 988.40 m Granite parfaitement sain.

-  Granite à plagioclases rose pâle et teinte chair.
-  Granite à plagioclases rouge orangé.
-  Granite à plagioclases marrons.

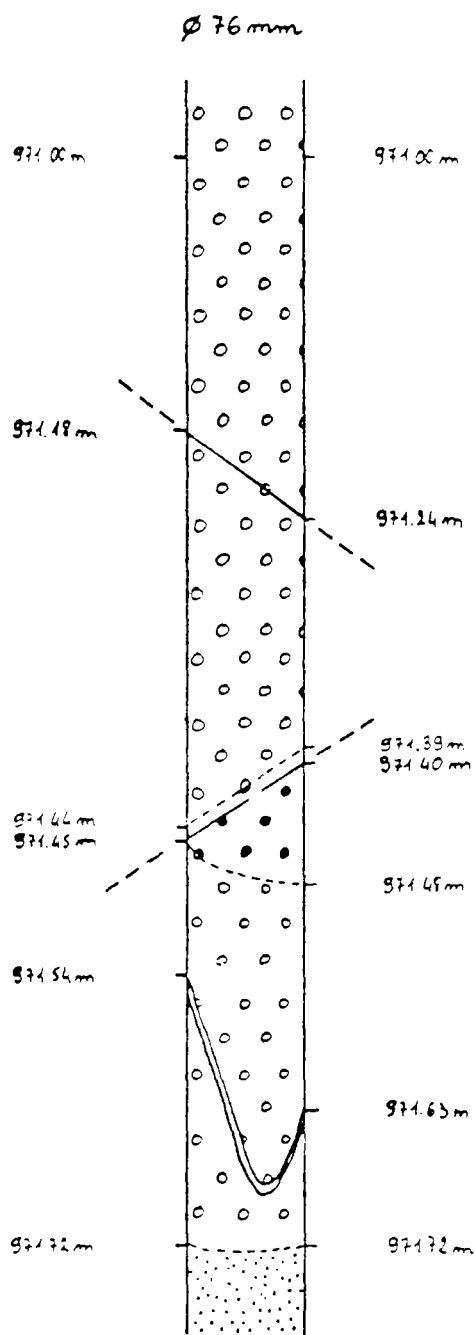


FIG.45



Granite sain



Granite à plagioclases
rose pâle et teinte
chair

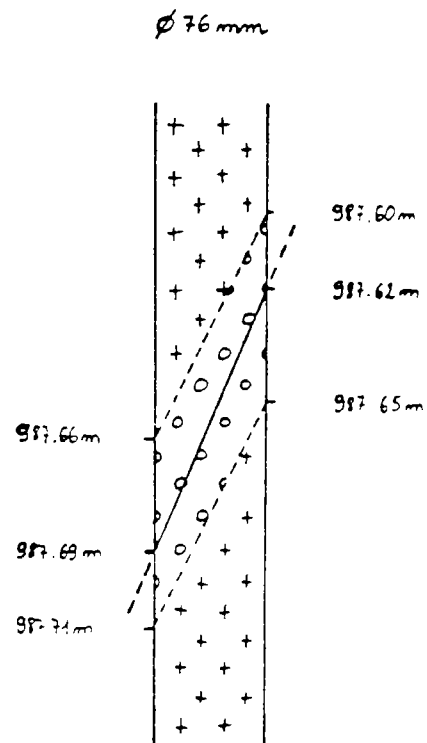


FIG.46

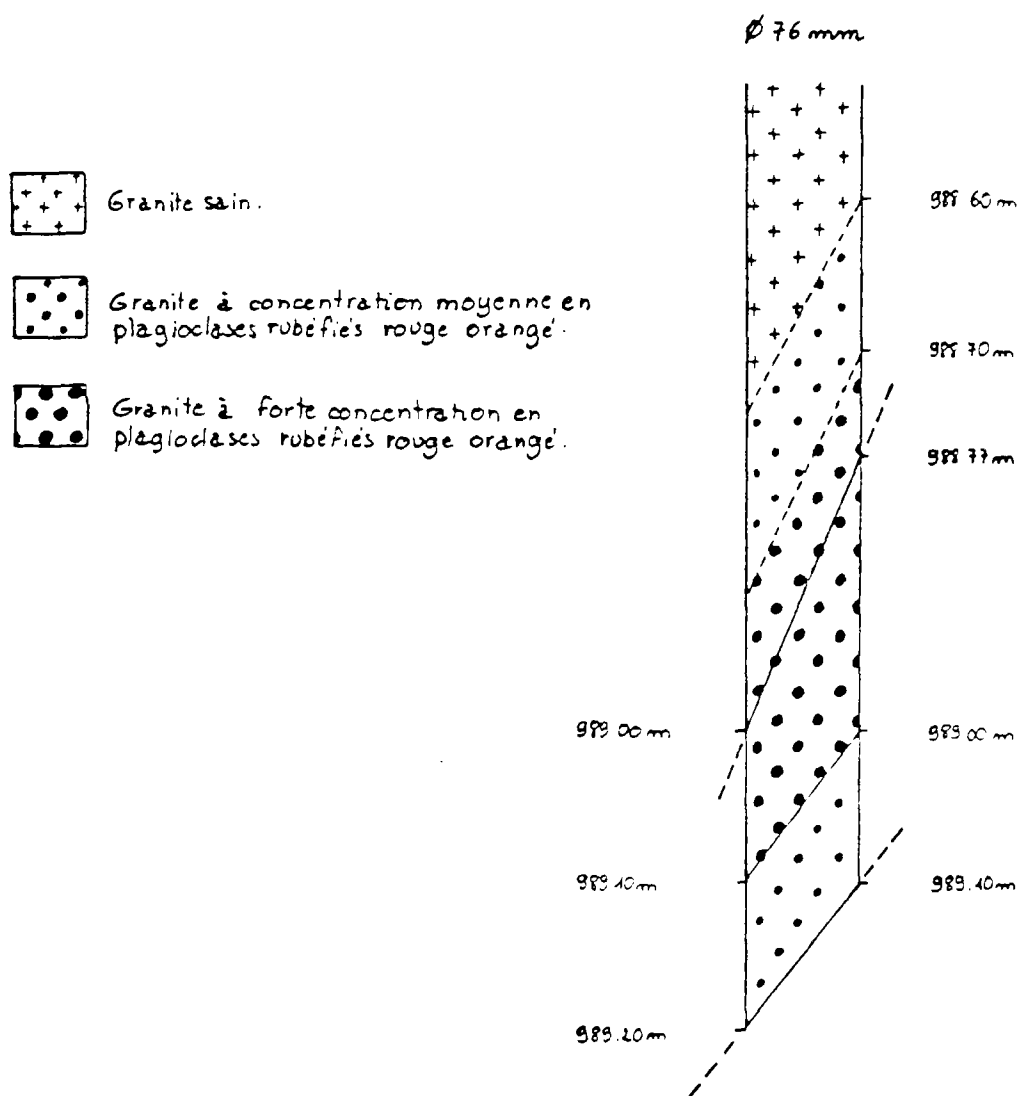


FIG. 47

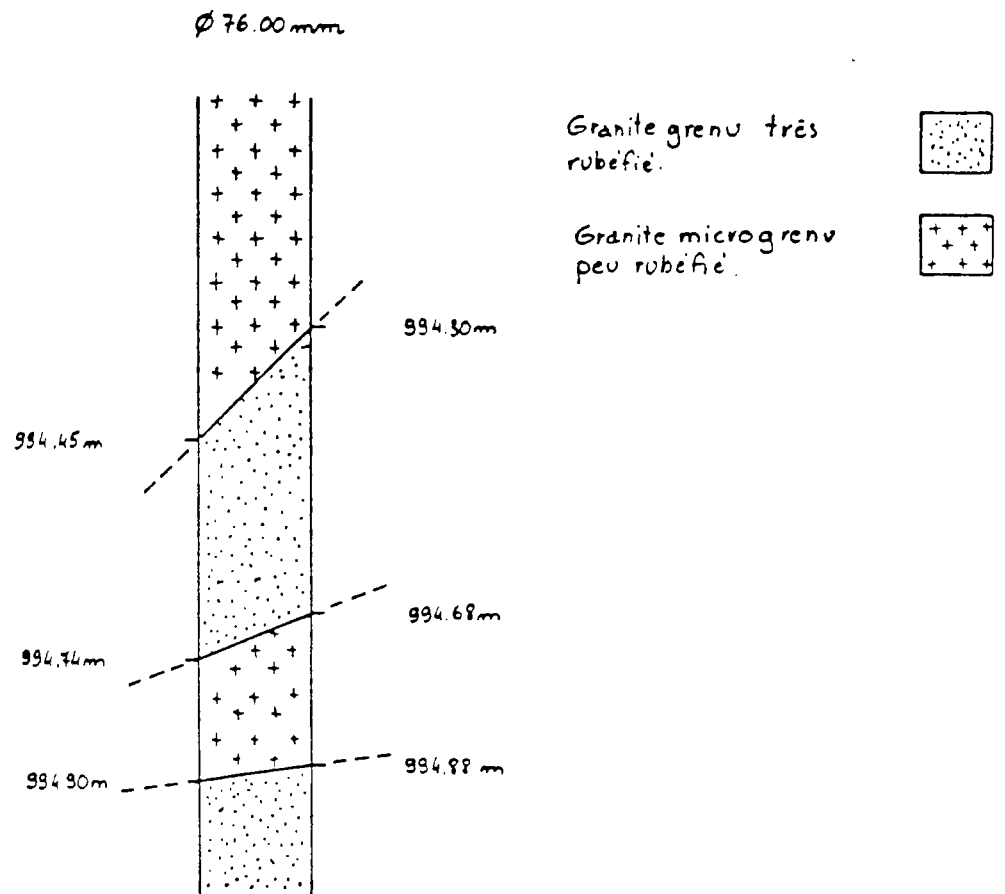


FIG.48

ϕ 76.00 mm

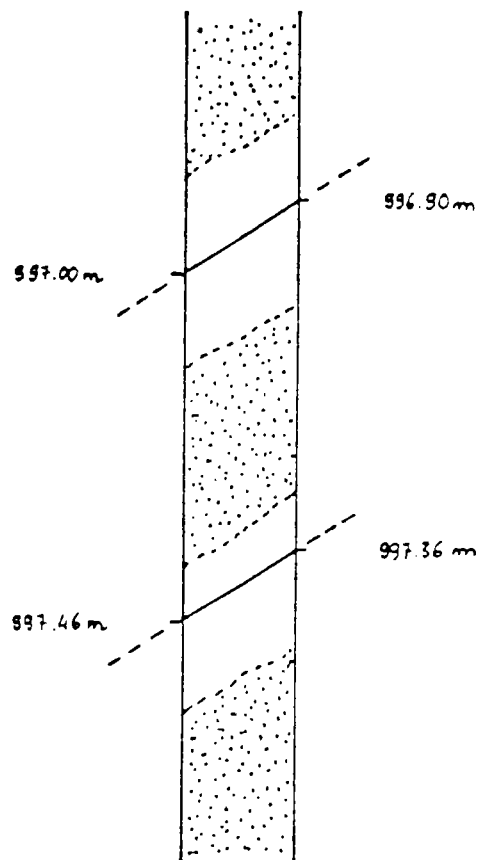
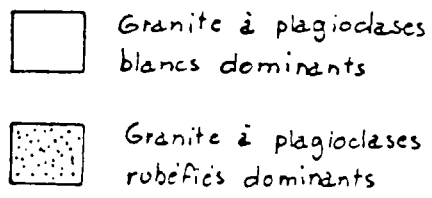


FIG. 49

Une zone fracturée avec altération autour des plagioclases.
(cf.fig.46)

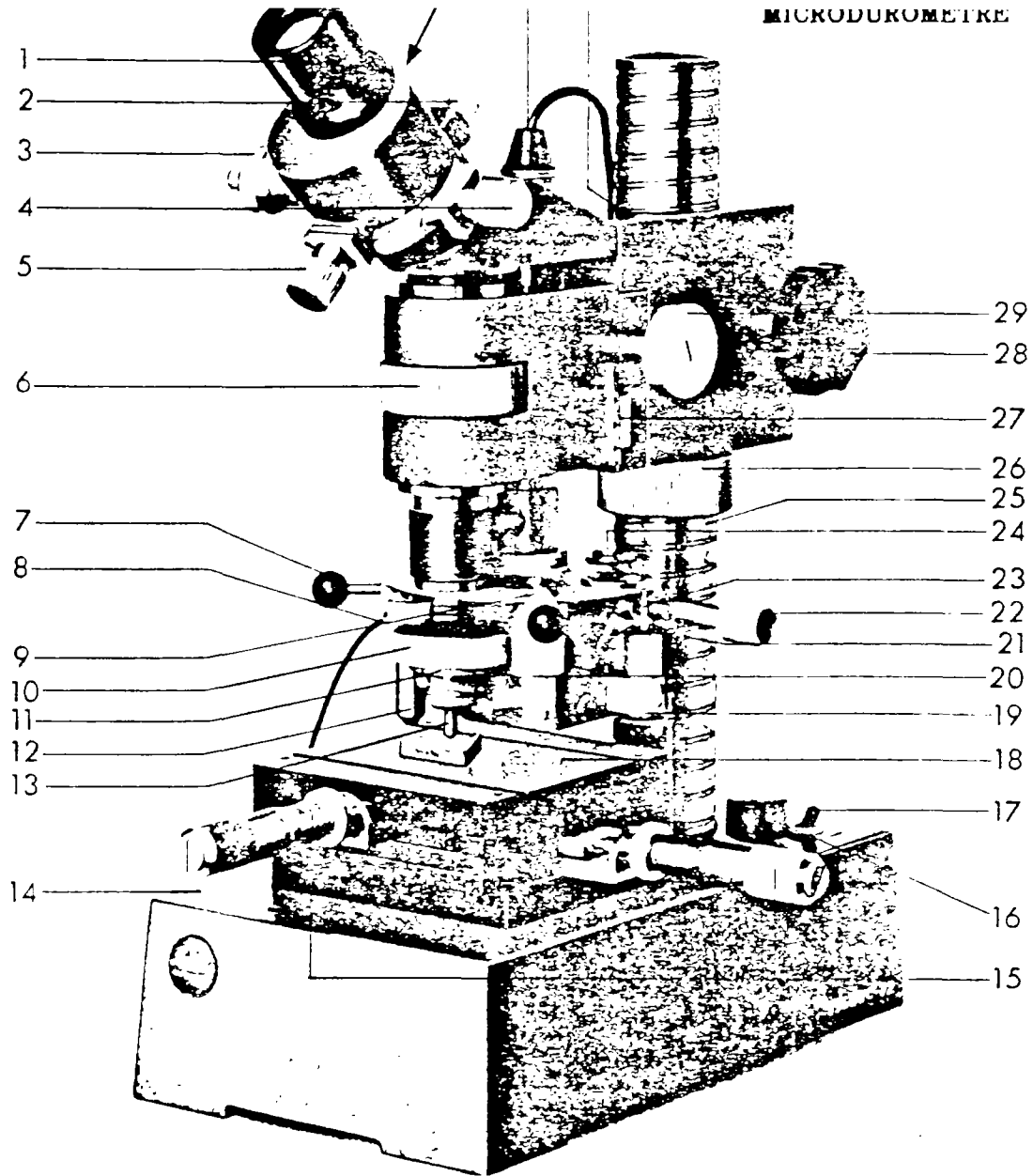
- 162 988.40 - 990.06 m Granite altéré de couleur dominante rouge orangée.
(cf.fig.47)
- 163 990.06 - 991.04 m Granite gris. Quelques plagioclases rose pâle isolés.
- 164 991.04 - 991.20 m Fond grenu. Phénocristaux zonés et allongés (4 cm de longueur). Plagioclases marron au centre et liséré rose pâle.
- 165 991.20 - 992.83 m Le granite est découpé par des fractures consolidées tous les 7 à 10 cm. Remplissage de couleur rouge et marron.
Entre les fracture les plagioclases sont soit blancs rose pâle, soit marron rose. Les phénocristaux rose pâle, teinte chair contrastent par rapport à la dominante rouge de la roche.
- 166 993.72 - 993.96 m Zone très riche en minéraux sombres.
- 167 993.96 - 994.95 m Zone très fracturée.
(cf.fig.48)
- 168 994.95 - 995.55 m Granite très rubéfié. Les fractures ont un remplissage brun rose. Présence de veines subverticales à forte concentration en biotites. Autour de ces zones, prédominance des plagioclases blancs par rapport aux plagioclases rubéfiés rouges.
- 169 995.55 - 998.18 m Granite grenu à phénocristaux de feldspath potassiques zonés de 4 à 5 cm de longueur. Nombreux plagioclases rubéfiés.
(cf.fig.49)

ANNEXE 1.3

LISTE DES ECHANTILLONS PRELEVES			
3.50 -	214.70	469.20 - 469.50	749.50 - 749.65
10.35 - 10.55	217.20 - 217.45	489.48 - 489.66	758.73 - 759.00
10.65 - 10.80	218.30 - 218.35	490.15 - 490.27	770.50 - 770.53
10.95 - 11.05	220.80 - 220.95	513.30 - 513.37	784.20 - 784.33
12.00 - 12.15	233.48 - 233.63	513.70 - 513.73	788.98 - 789.25
13.25 - 13.55	237.30 - 237.50	513.88 - 514.00	795.28 - 795.50
15.25 - 15.40	246.50 -	524.10 - 524.00	803.70 - 803.95
16.00 - 16.20	250.80 -	535.29 - 535.45	825.64 - 825.80
16.70 - 16.95	254.07 - 254.18	555.03 - 555.12	825.84 - 826.15
17.40 - 17.40	254.68 - 254.81	555.45 - 555.52	830.05 - 830.15
18.00 -	262.63 - 262.80	562.25 - 562.30	840.33 - 840.64
20.80 - 21.00	263.46 - 263.61	563.60 - 563.70	854.63 - 854.87
21.00 - 21.15	272.50 - 272.70	590.03 - 590.10	855.20 - 855.30
23.00 -	281.85 - 282.00	590.50 - 590.60	860.75 - 860.95
23.50 - 24.20	301.80 - 302.06	591.30 - 591.45	866.00 - 866.40
27.40 - 27.60	308.80 - 308.93	594.50 - 594.57	872.43 - 872.58
30.20 - 30.35	309.15 - 309.30	596.36 - 596.48	878.57 - 878.70
34.20 - 34.30	314.40 - 314.48	602.96 - 603.07	886.03 - 886.24
41.90 - 42.05	314.82 - 314.95	612.06 - 612.37	905.45 - 905.65
60.05 - 60.15	324.05 - 324.15	613.20 -	913.10 - 913.27
75.47 - 75.50	340.30 - 340.60	616.45 - 616.60	919.89 - 920.04
75.50 - 75.68	347.65 - 347.84	617.00 - 617.07	932.85 - 933.05
92.40 - 92.67	375.52 - 375.70	617.18 - 617.30	945.17 - 945.37
105.10 - 105.25	376.33 - 376.45	623.80 - 624.03	954.51 - 954.65
119.65 - 119.80	391.10 - 391.24	629.71 - 629.90	966.40 - 966.95
153.35 - 153.54	391.53 - 391.62	633.71 - 633.91	967.90 - 968.07
153.85 - 154.02	391.83 - 391.95	643.73 - 644.00	969.66 - 969.74
160.05 - 160.25	400.95 - 401.03	651.55 - 651.70	976.60 - 976.77
171.12 - 171.45	402.60 - 401.70	658.26 - 658.45	981.60 - 982.00
195.00 - 195.10	402.80 - 403.00	673.54 - 673.74	985.55 - 985.88
196.45 - 196.70	417.10 - 417.20	682.20 -	990.63 - 990.70
196.75 - 196.80	418.70 - 418.95	682.55 - 682.81	991.60 - 991.82
202.22 - 202.45	440.60 - 440.80	699.12 - 699.25	994.36 - 994.42
209.70 - 209.90	450.28 - 450.40	718.00 - 718.15	994.67 -
214.50 -	450.40 - 450.60	730.30 - 730.64	

ANNEXE 1.4

LISTE DES LAMES MINCES							
Prof. (m)	Nbr	Prof. (m)	Nbr	Prof. (m)	Nbr	Prof. (m)	Nbr
3.50		214.70		469.20	1	749.50	1
10.35		217.20	1	489.48	1	758.73	1
10.65		218.30	1	490.15	1	770.50	1
10.95		220.80	1	513.30		784.20	1
12.00	1	233.48	1	513.70	1	788.98	
13.25		237.30	1	513.88	1	795.28	
15.25	1	246.50		524.10	1	803.70	
16.00		250.80	1	535.29	1	825.64	1
16.70		254.07	1	555.03	1	825.84	1
17.40	1	254.68	1	555.45	1	830.05	
18.00		262.63	1	562.25	1	840.33	
20.80	1	263.46		563.60	1	854.63	
21.00		272.50	1	590.03	1	855.20	2
23.00		281.85		590.50	1	860.75	
23.50		301.80	1	591.30	1	866.00	2
27.40	1	308.80	1	594.50		872.43	
30.20		309.15	1	596.36		878.57	
34.20	1	314.40	1	602.96		886.03	1
41.90		314.82	1	612.06		905.45	
60.05	1	324.05	1	613.20	1	913.10	1
75.47		340.30		616.45	1	919.89	
75.50		347.65		617.00	1	932.85	1
92.40		375.52	1	617.18	1	945.17	
105.10	1	376.33	1	623.80		954.51	
119.65	1	391.10	1	629.71		966.40	2
153.35	2	391.53	1	633.71		967.90	
153.85	1	391.83	1	643.73	1	969.66	1
160.05		400.95		651.55		976.60	
171.12	1	402.60	1	658.26		981.60	3
195.00		402.80	1	673.54	1	985.55	
196.45	1	417.10	1	682.20	1	990.63	
196.75		418.70	1	682.55	1	991.60	
202.22	1	440.60	1	699.12	1	994.36	
209.70		450.28	1	718.00		994.67	
214.50		450.40	1	730.30	1		



- | | |
|--|---|
| 1 Oculaire de mesure de précision | 18 Platine de mesure (surface d'appui de l'échantillon) |
| 2 Vis de blocage de l'oculaire; quand cette vis est desserrée, l'oculaire peut tourner autour de son axe | 19 Vis moletée de réglage de la vitesse de descente du diamant |
| 3 Tambour de réglage de la graduation de l'oculaire | 20 Objectif chercheur (grossissement 100x, diamètre du champ-objet 1,8 mm) |
| 4 Bouton de déplacement longitudinal de l'oculaire | 21 Couverture du frein à huile avec orifice de remplissage |
| 5 Bouton de déplacement transversal de l'oculaire | 22 Bouton moleté destiné à relever le pénétrateur |
| 6 Bague moletée de mise au point fine sur la surface de l'échantillon | 23 Tige du piston de frein |
| 7 Poignée pour mettre en position de service soit l'un des objectifs, soit le diamant | 24 Trou de blocage du revolver quand le diamant est abaissé |
| 8 Déclencheur flexible | 25 Colonne avec filetage à pas rapide |
| 9 Ressort du crantage | 26 Manchon moleté de réglage en hauteur de la partie supérieure du DURIMET sur la colonne |
| 10 Poids constituant la charge de l'essai | 27 Reglette graduée avec vernier pour le repérage du réglage en hauteur du DURIMET |
| 11 Plateau supportant le poids | 28 Bouton de blocage sur la colonne de la partie supérieure du DURIMET |
| 12 Objectif de mesure (pour grossissement 400x, diamètre du champ-objet 0,45 mm) | 29 Bouton moleté (mouvement rapide) de réglage en hauteur du DURIMET |
| 13 Diamant | 30 Index-repère de position normale du DURIMET |
| 14 Surface du socle supportant la platine de mesure | 31 Dispositif d'éclairage à lampe de bas voltage (8 V 15 W) interchangeable |
| 15 Broches micrométriques (course 25 mm) | 32 Fenêtre d'éclairage de l'oculaire (non visible sur la figure) |
| 16 Bouton du potentiomètre pour le réglage de l'intensité lumineuse | |
| 17 Interrupteur de l'éclairage | |

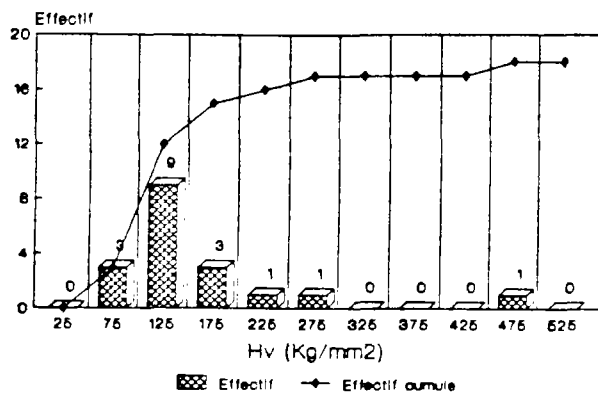
ANNEXE 2.2

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS INDICES DE MEYER

Nous proposons dans les pages qui suivent les représentations graphiques des répartitions des duretés Vickers. Chaque page est compartimentée de la manière suivante :

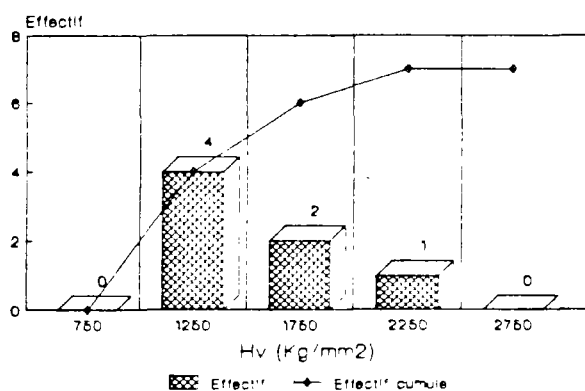
- à gauche : histogramme représentatif de la distribution des microduretés pour un minéral donné.
- à droite : représentation de la droite de Meyer quand celle-ci a pu être déterminée.

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 12.00



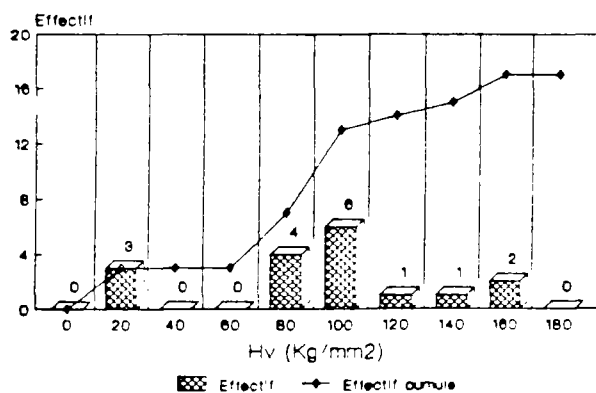
Minéral No 1 : biotite

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 12.00



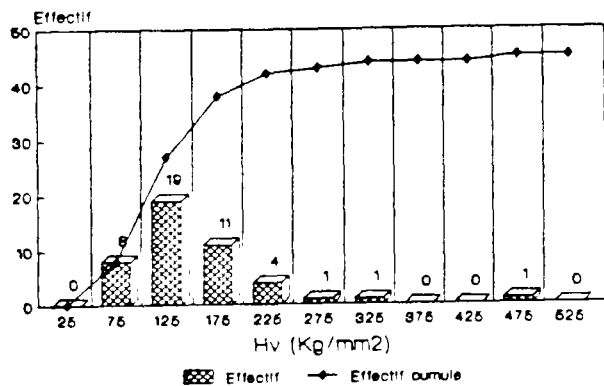
Minéral No 2 : feldspath potassique

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 34.20

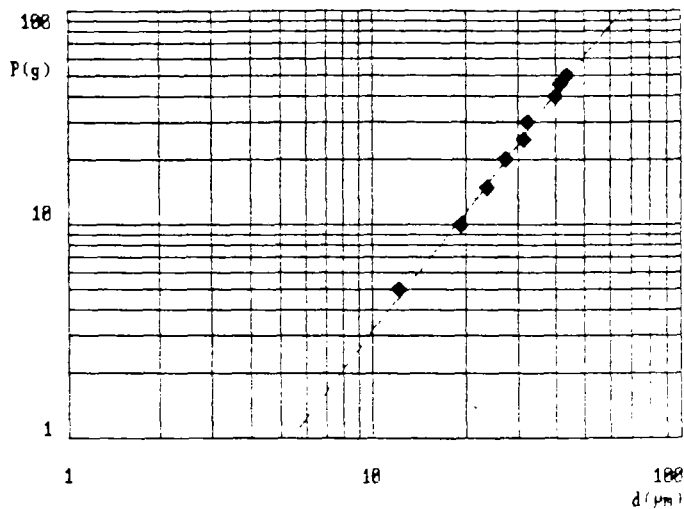


Biotite chloritisee

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 217.20

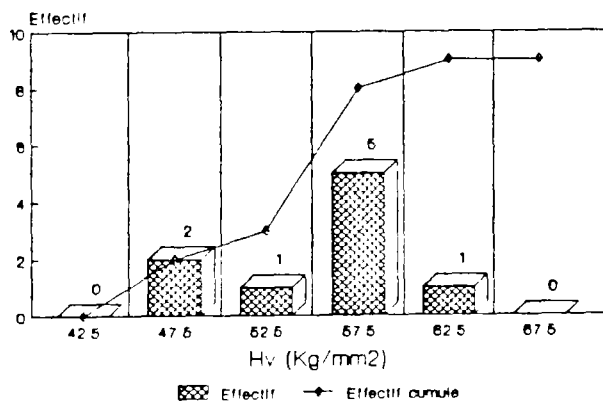


Mineral No 1 : plagioclase altère

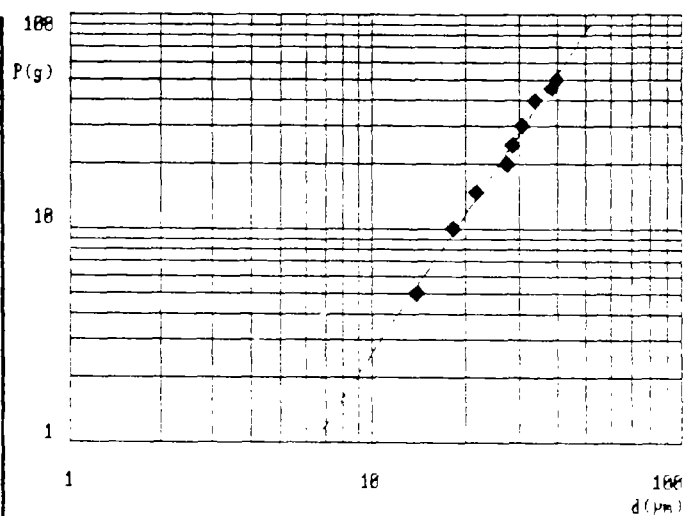


$$Hv_{G10\mu m} = 59.46 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.832$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 217.20

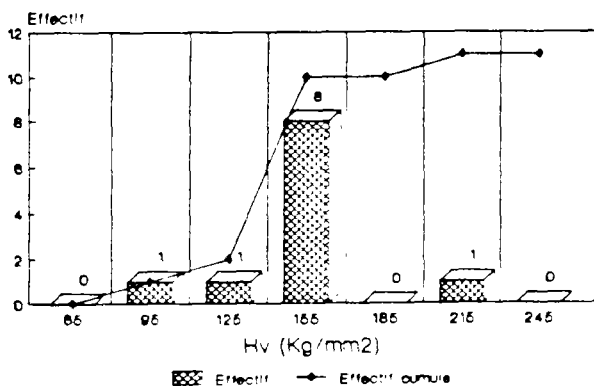


Mineral No 2 : plagioclase altère



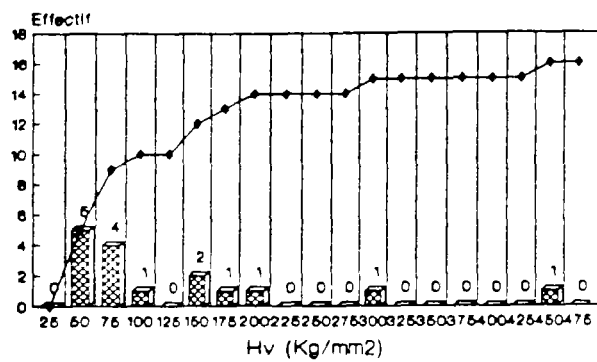
$$Hv_{G10\mu m} = 47.56 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.156$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 220.80



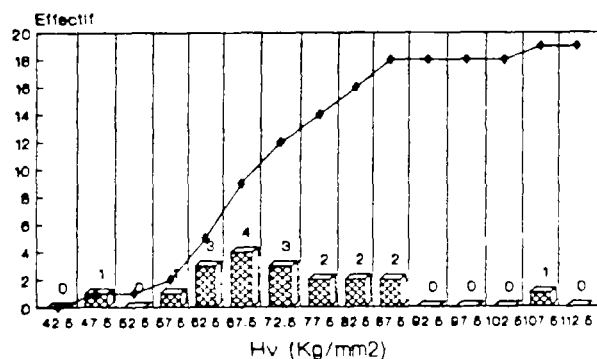
Mineral No 1 : biotite

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 237.30

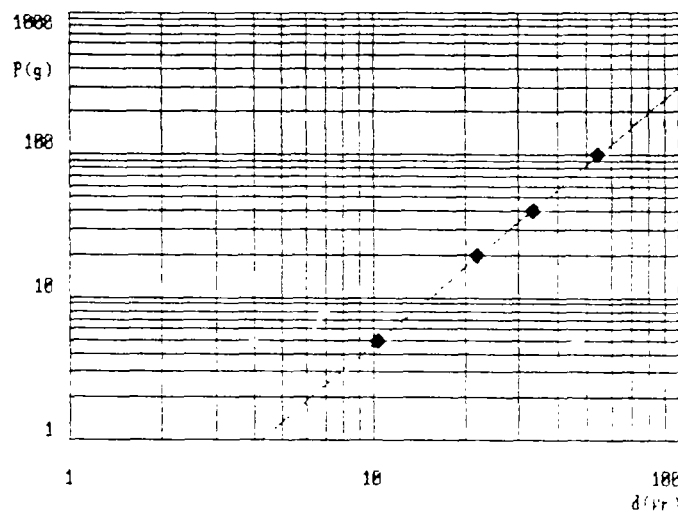


Mineral chloritise

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80

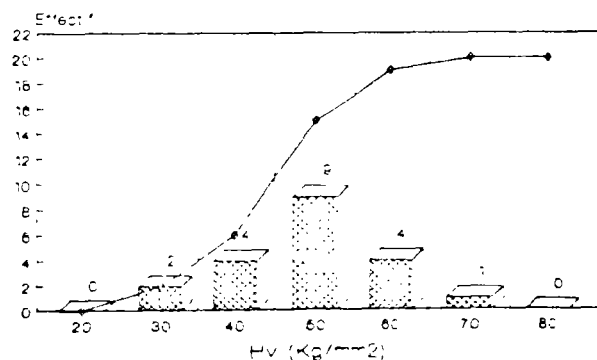


Mineral No 1: biotite

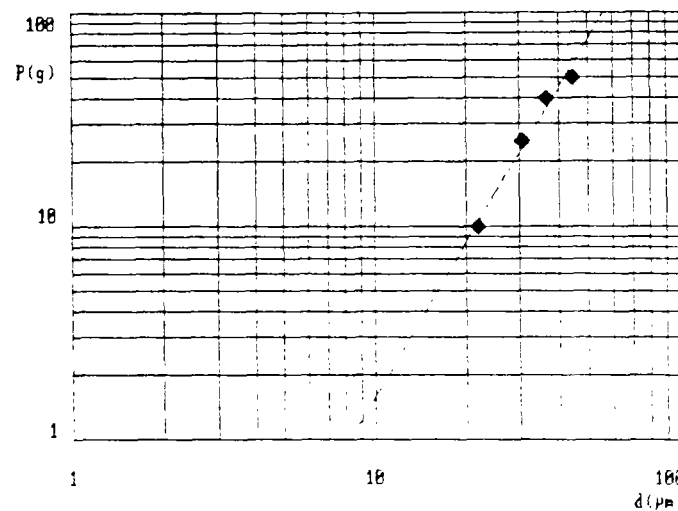


$$Hv_{0.10\mu m} = 88.94 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.801$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80

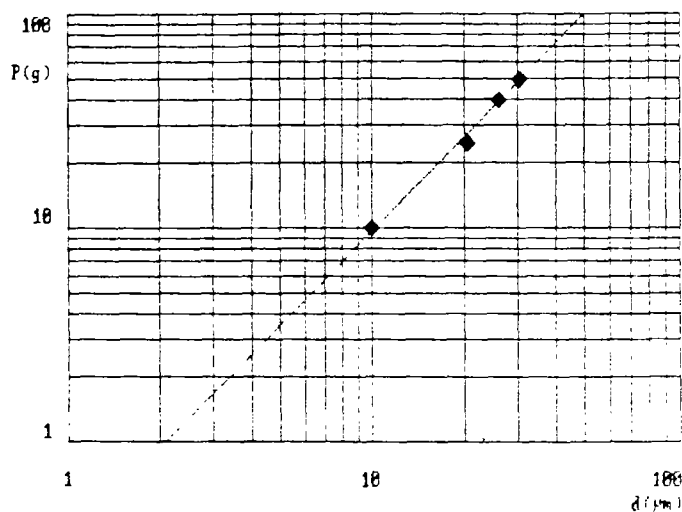
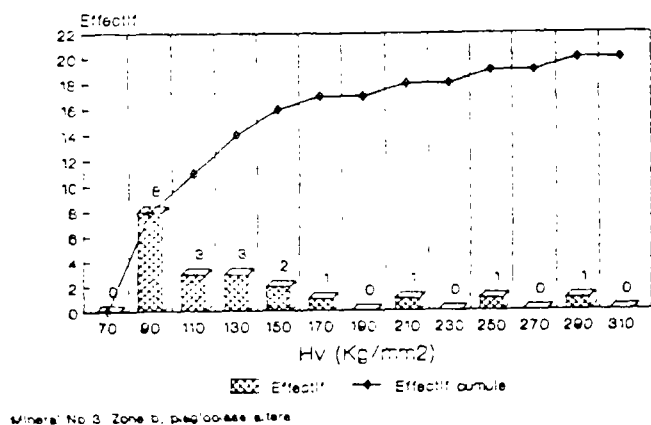


Mineral No 3: Zone a: plagioclase altered



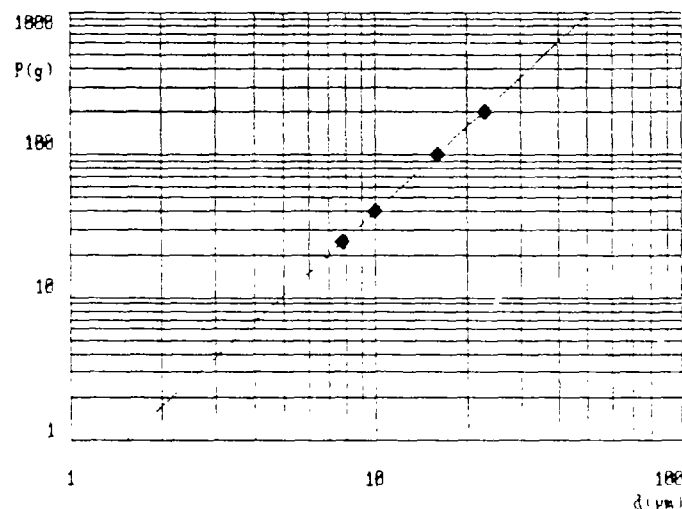
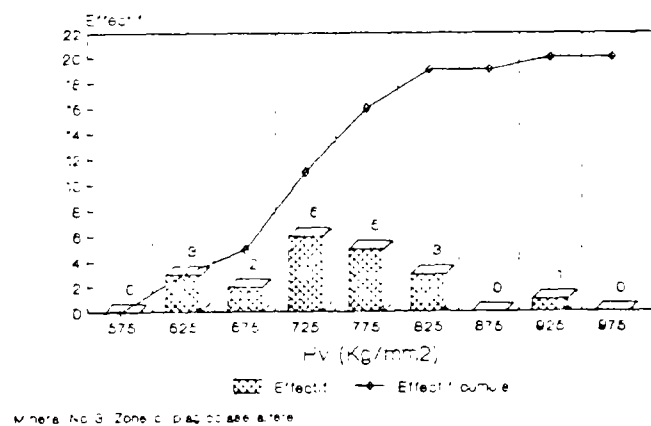
$$Hv_{0.10\mu m} = 29.59 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.389$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80



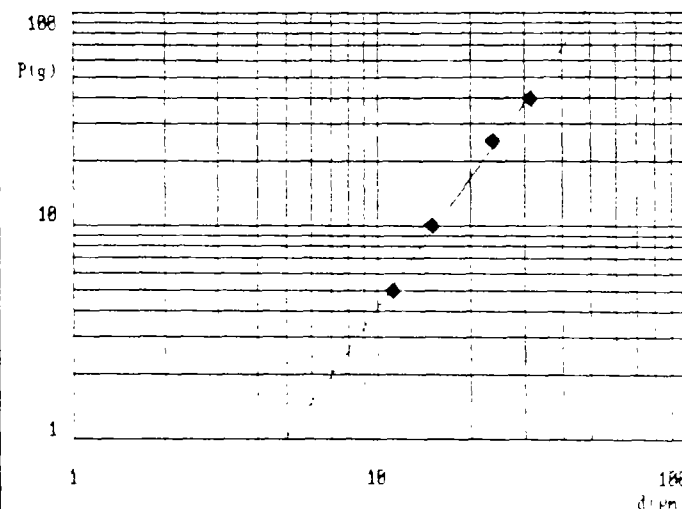
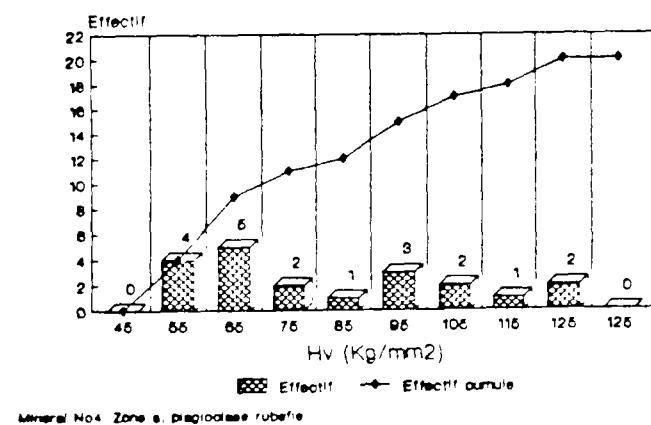
$$Hv_{G10\mu m} = 125.08 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.829$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80



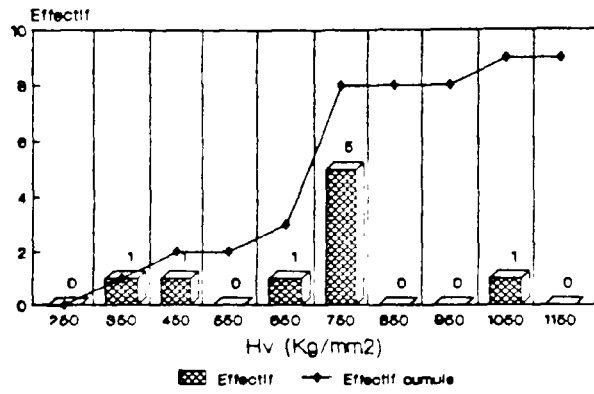
$$Hv_{G10\mu m} = 746.80 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.955$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80



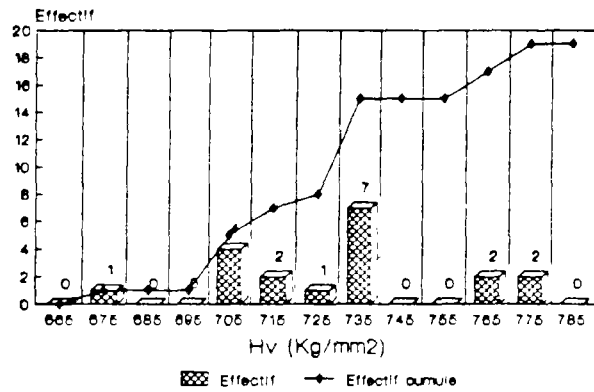
$$Hv_{G10\mu m} = 77.77 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.013$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80

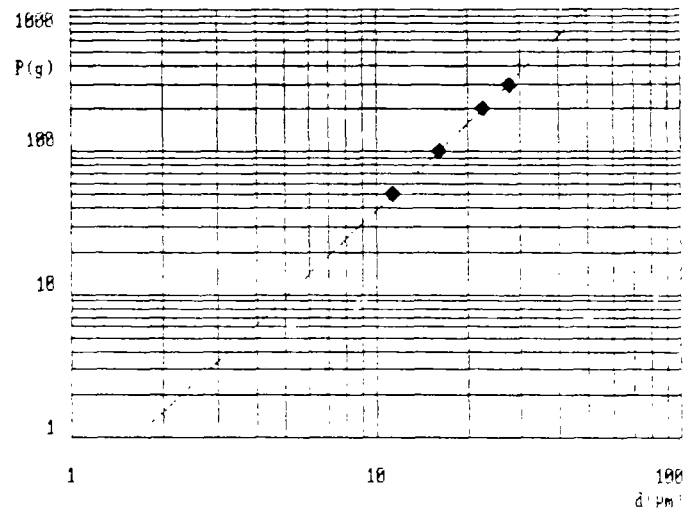


Mineral No4: Zone b1-b2, plagio rubelle

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 301.80

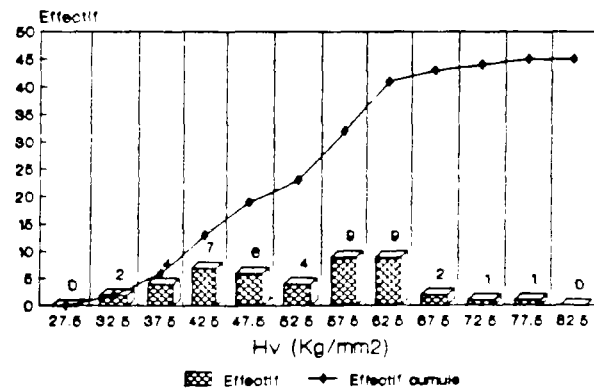


Mineral No4: Zone c, plagioclase rubelle

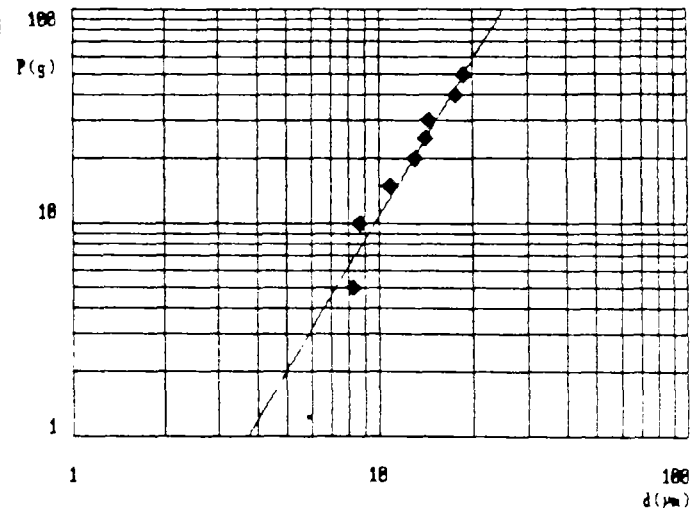


$$HV_{0.10\mu m} = 719.79 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.017$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 513.88

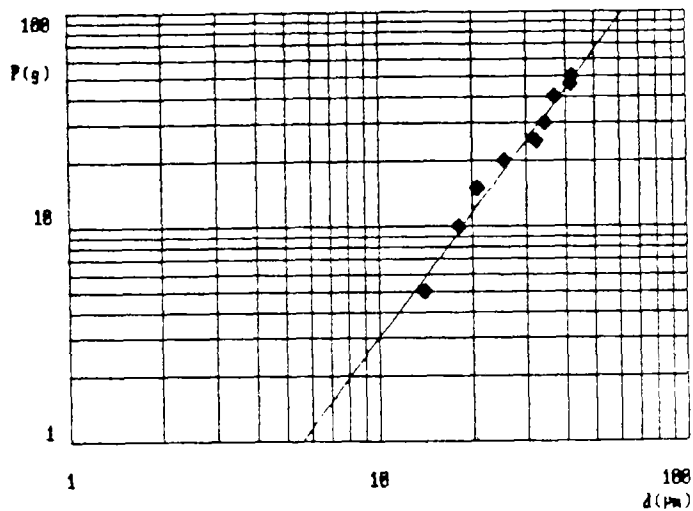
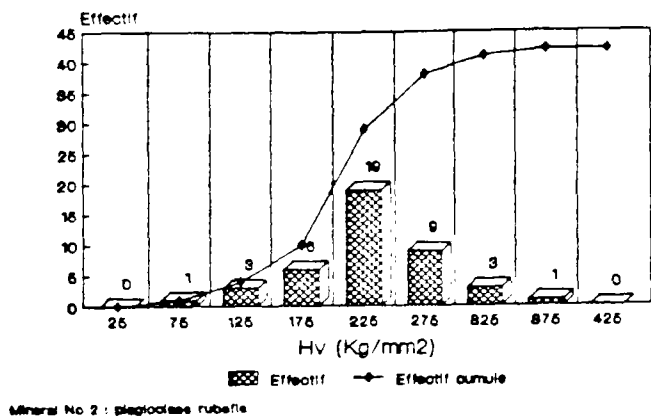


Mineral Not liere blanc - plagioclase



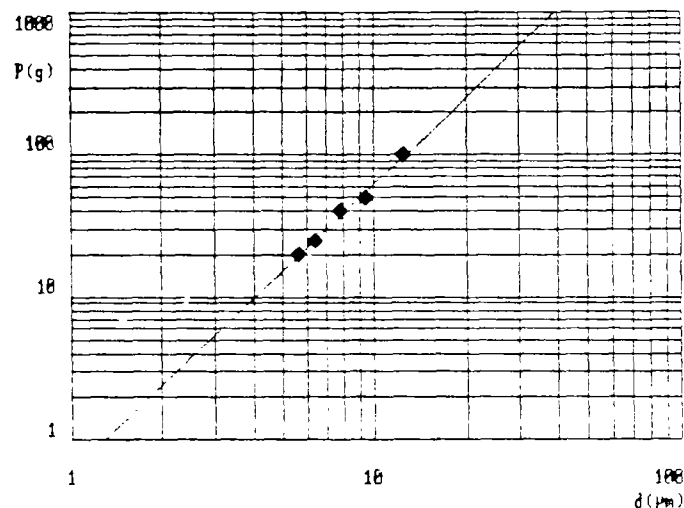
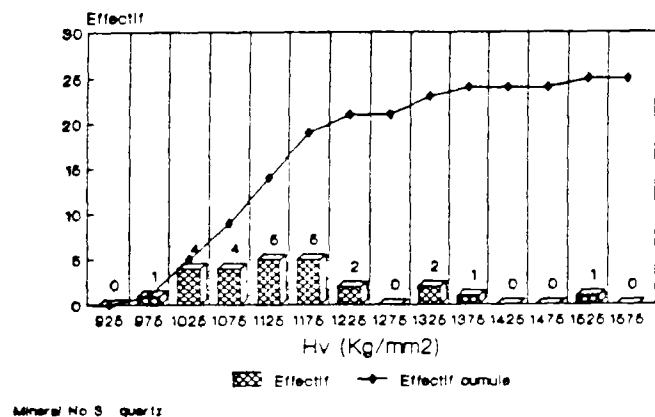
$$HV_{0.10\mu m} = 238.34 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.051$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 513.88



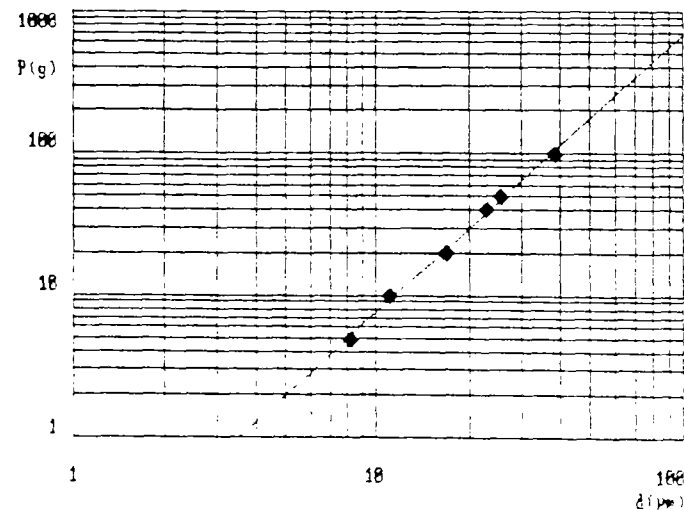
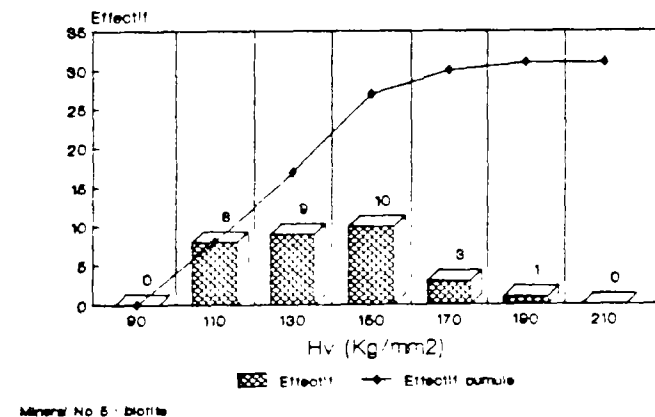
$$HV_{G100\mu m} = 56.26 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.915$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 513.88



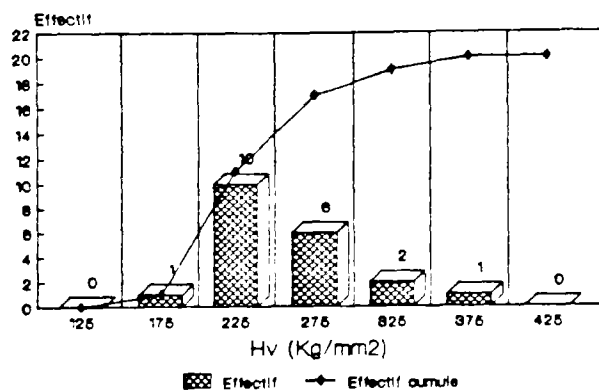
$$HV_{G100\mu m} = 1159.32 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.021$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 513.88

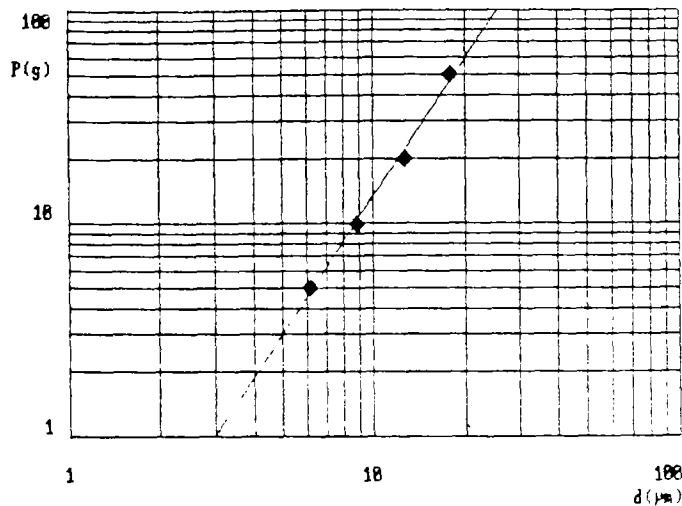


$$HV_{G100\mu m} = 141.32 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 1.949$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 513.88

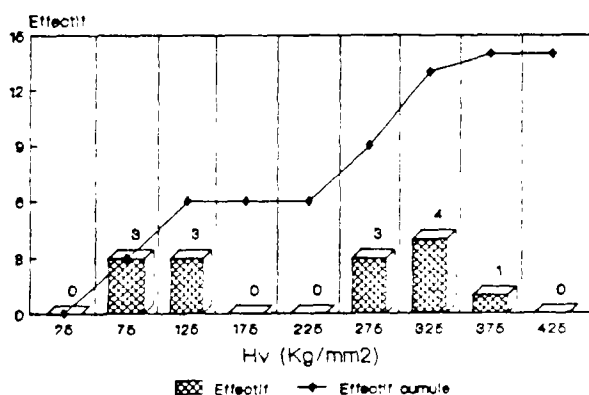


Minéral No 6 : microfessure verticale

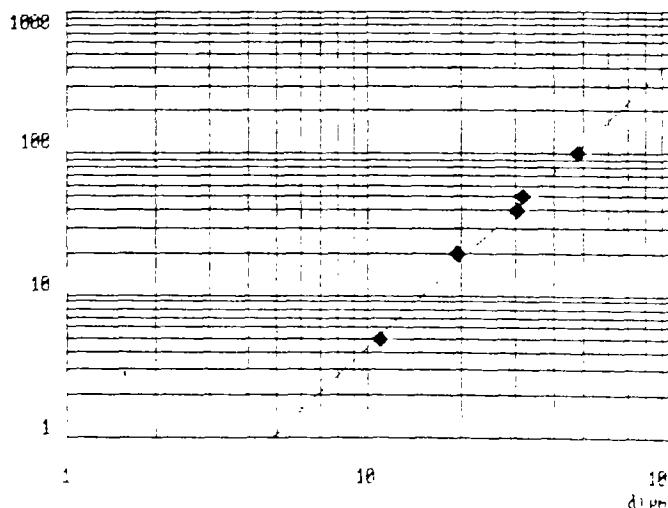


$$Hv_{G100\mu m} = 247.29 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.145$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 855.20

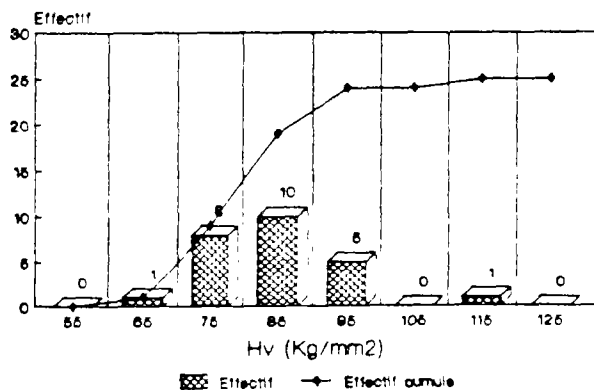


Minéral No 7 : muscovite



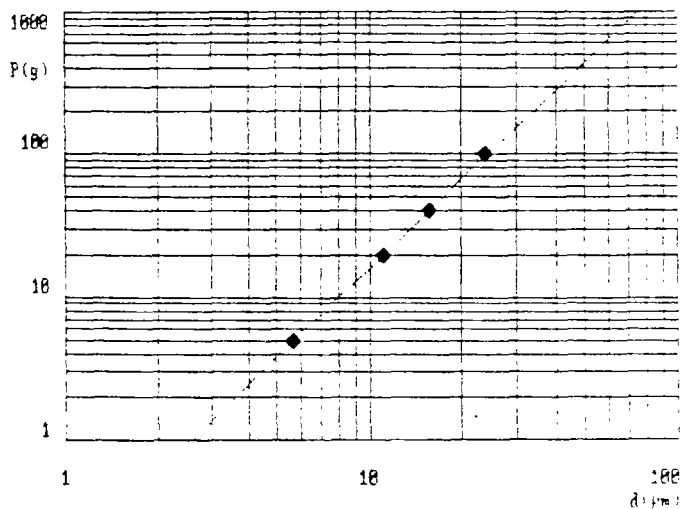
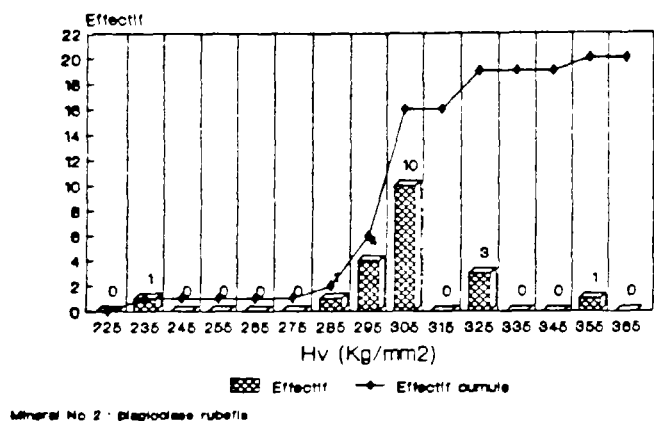
$$Hv_{G100\mu m} = 81.32 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.034$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66



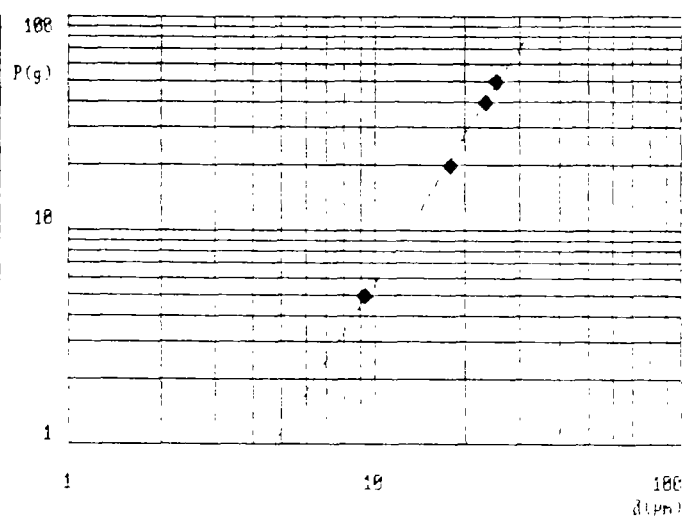
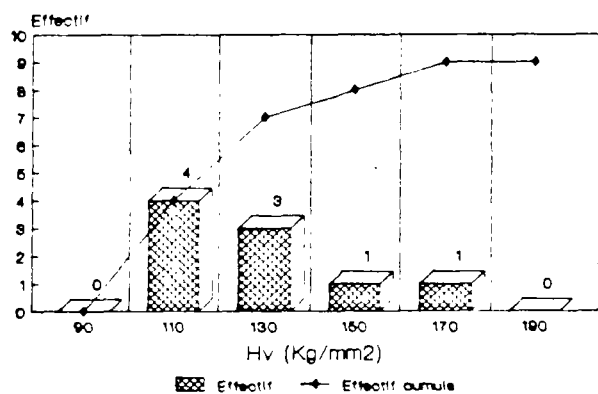
Minéral No 1 : biotite

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66



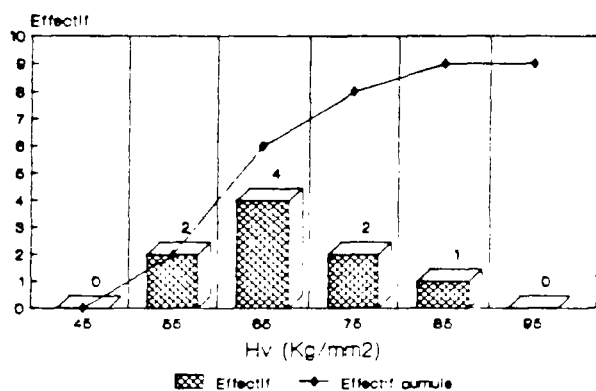
$$HV_{G10\mu m} = 300.75 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.061$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66

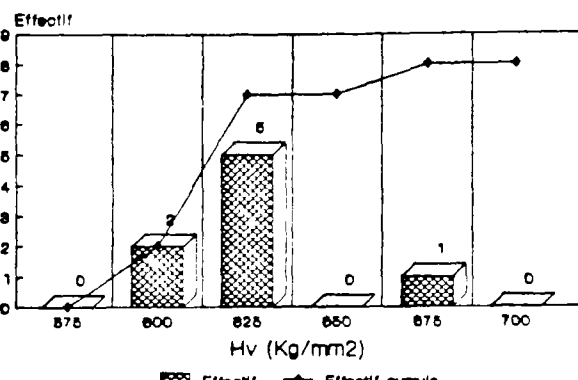


$$HV_{G10\mu m} = 105.49 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.298$$

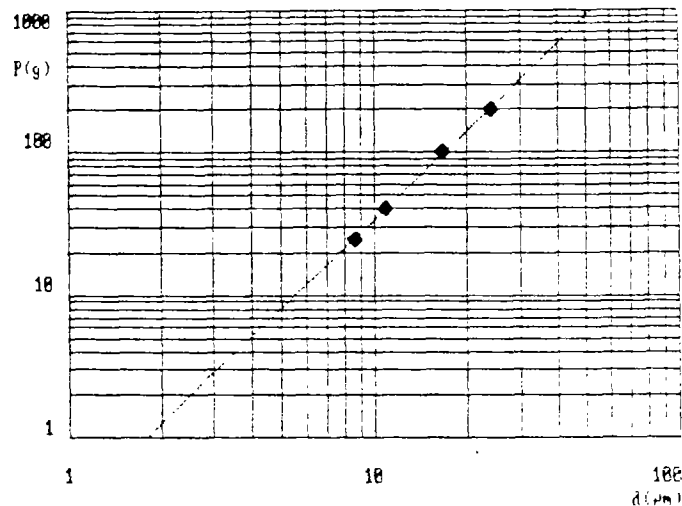
REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66



REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66

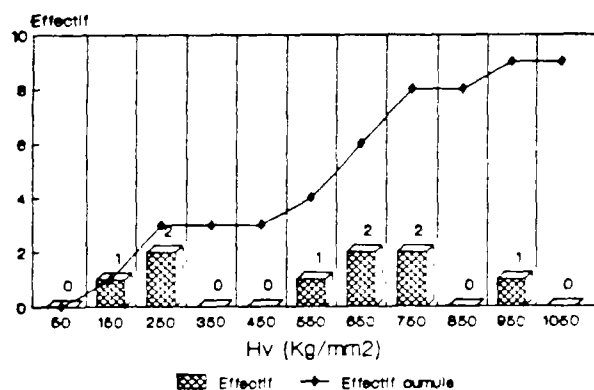


Mineral No 3 : Zone o, Fk zone

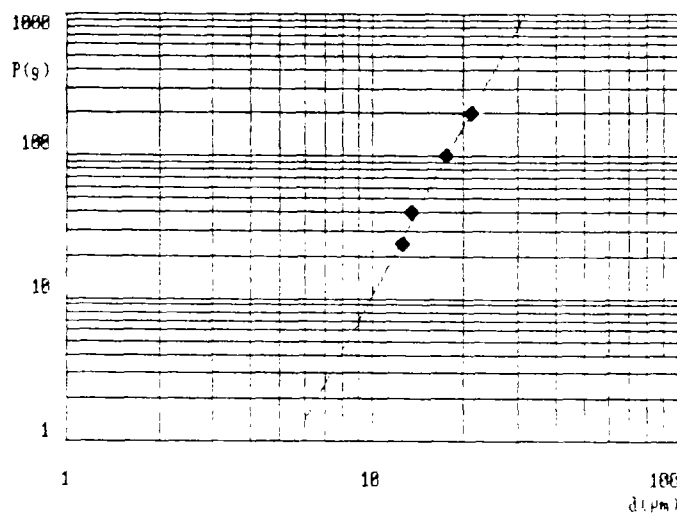


$$HV_{G10\mu m} = 629.80 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 2.045$$

REPARTITION DES MICRODURETES VICKERS Echantillon 969.66



Mineral No 4 : plagioclase rubellé



$$HV_{G10\mu m} = 193.29 \text{ kg/mm}^2 \quad m = 3.957$$

ANNEXE 3.1

MODE OPERATOIRE PESEE HUMIDE AVEC UN PAPIER SEC EN VUE DE LA DETERMINATION DE LA POROSITE TOTALE A L'EAU

- 1 - Sortir l'éprouvette de l'eau désaérée.
- 3 - Sortir une feuille de papier hygiénique (16.5 X 10.5 cm)
- 2 - Essuyer l'éprouvette en la roulant sur la longueur du papier (éprouvettes $\phi = 20$ mm ;H = 40 mm) ou sur la largeur (éprouvettes $\phi = 10$ mm ;H = 20 mm). Un passage simple suffit.
- 3 - Essuyer les base de l'éprouvette.
- 4 - Peser l'éprouvette à ± 0.1 mg avec une balance de précision.

ANNEXE 3.2

Sont réunies dans les pages suivantes les représentations graphiques des différentes relations pouvant exister entre les mesures de porosité.

Nous rappelons ci-dessous la signification des symboles employés :

P_{hum1} après essuyage étoffe humide - Opérateur N°1 :

$$n1 = (P_{hum1} - P_{sec}) / (V_{t3} * \rho_{eau})$$

P_{hum1} après essuyage étoffe humide - Opérateur N°2 :

$$n2 = (P_{hum1} - P_{sec}) / (V_{t3} * \rho_{eau})$$

P_{hum1} après essuyage papier sec absorbant :

$$n3 = (P_{hum1} - P_{sec}) / (V_{t3} * \rho_{eau})$$

P_{hum1} après essuyage papier sec peu absorbant :

$$n4 = (P_{hum1} - P_{sec}) / (V_{t3} * \rho_{eau})$$

P_{hum2} à partir des courbes de séchage :

$$n5 = (P_{hum2} - P_{sec}) / (V_{t3} * \rho_{eau})$$

Porosité calculée à partir de la propagation des ondes soniques L

$$nV = (1/V_{Lsat} - 1/V_{Lsec}) / (1/V_{Leau} - 1/V_{Lair})$$

V_{t3} : volume de l'échantillon déterminé avec le pied à coulisse.

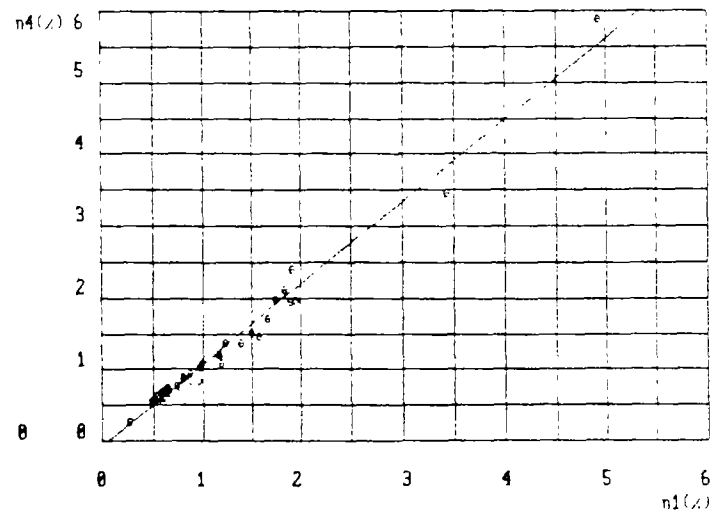
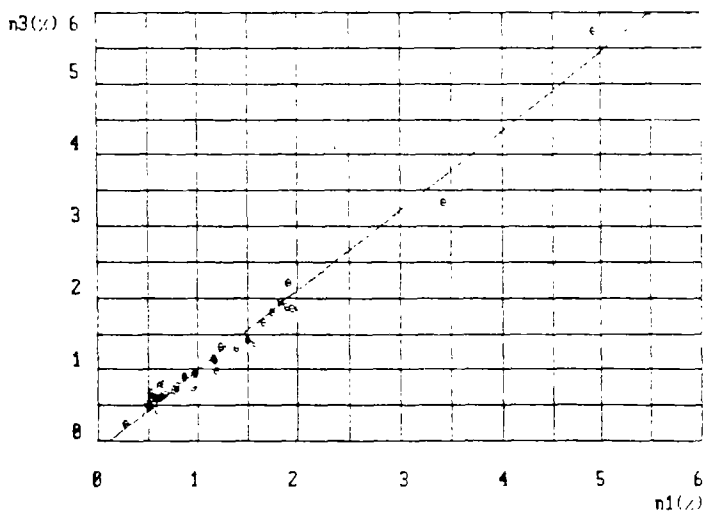
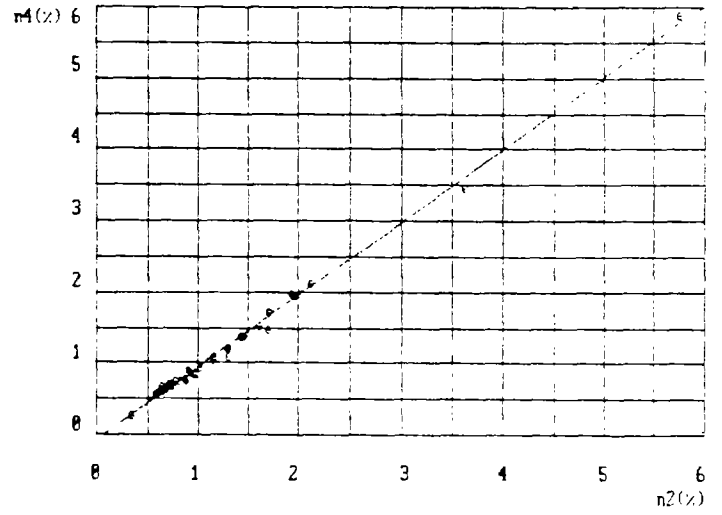
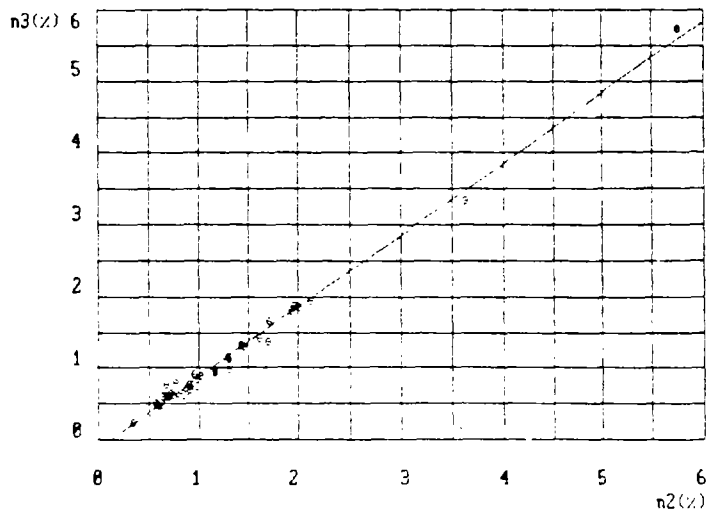
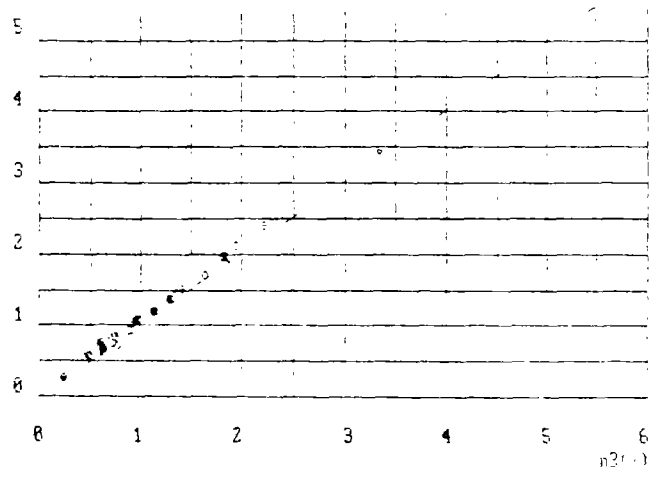
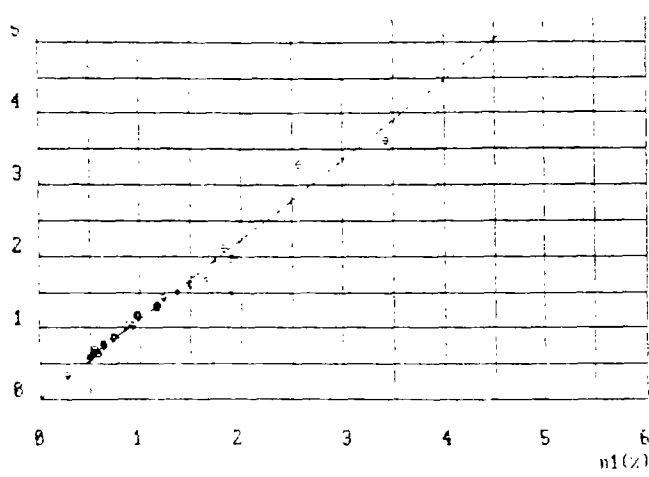
ρ_{eau} : masse volumique de l'eau.

V_{Lsec} : vitesse des ondes L dans l'échantillon sec.

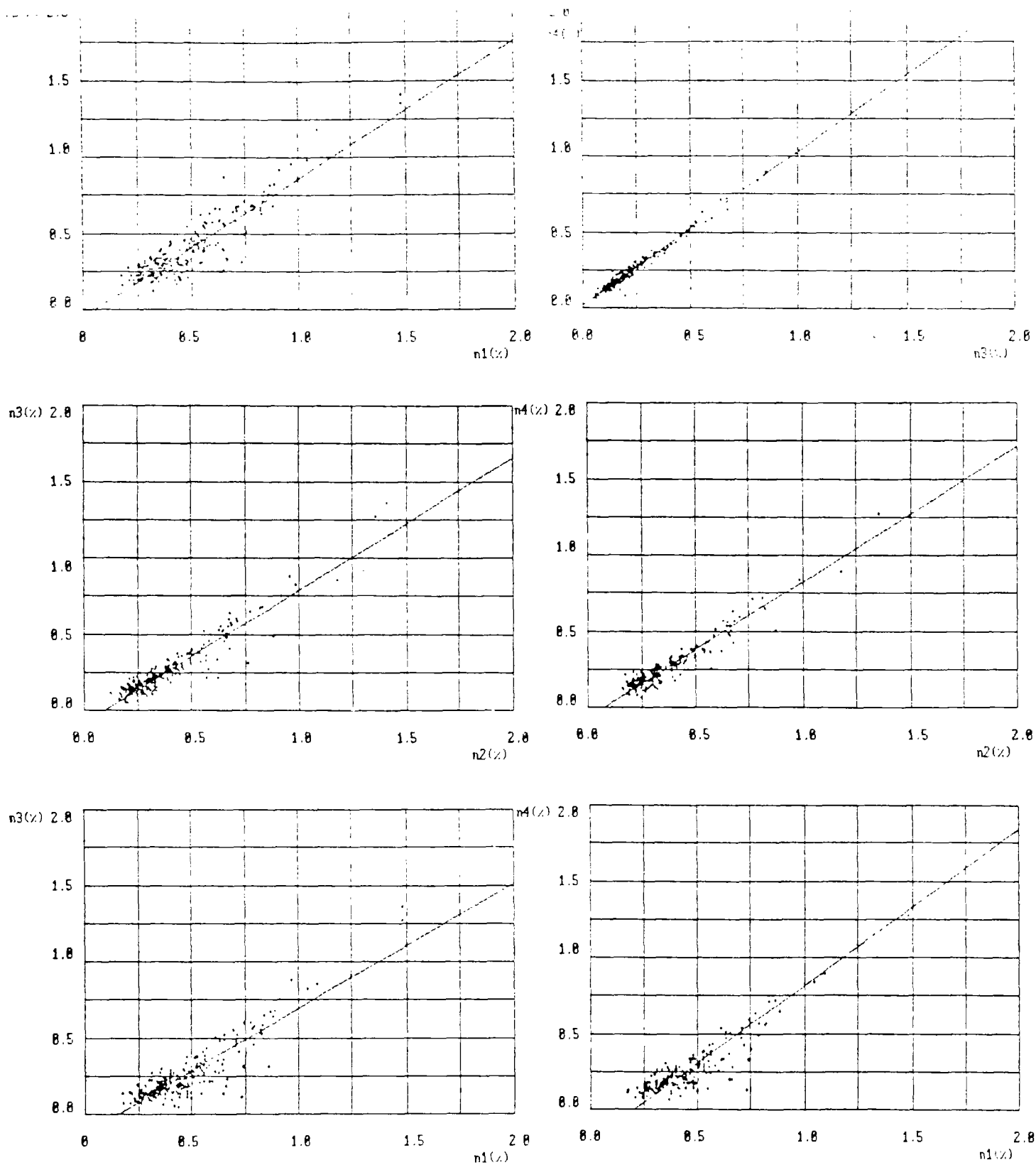
V_{Lsat} : vitesse des ondes L dans l'échantillon saturé.

V_{Leau} : vitesse des ondes L dans l'eau.

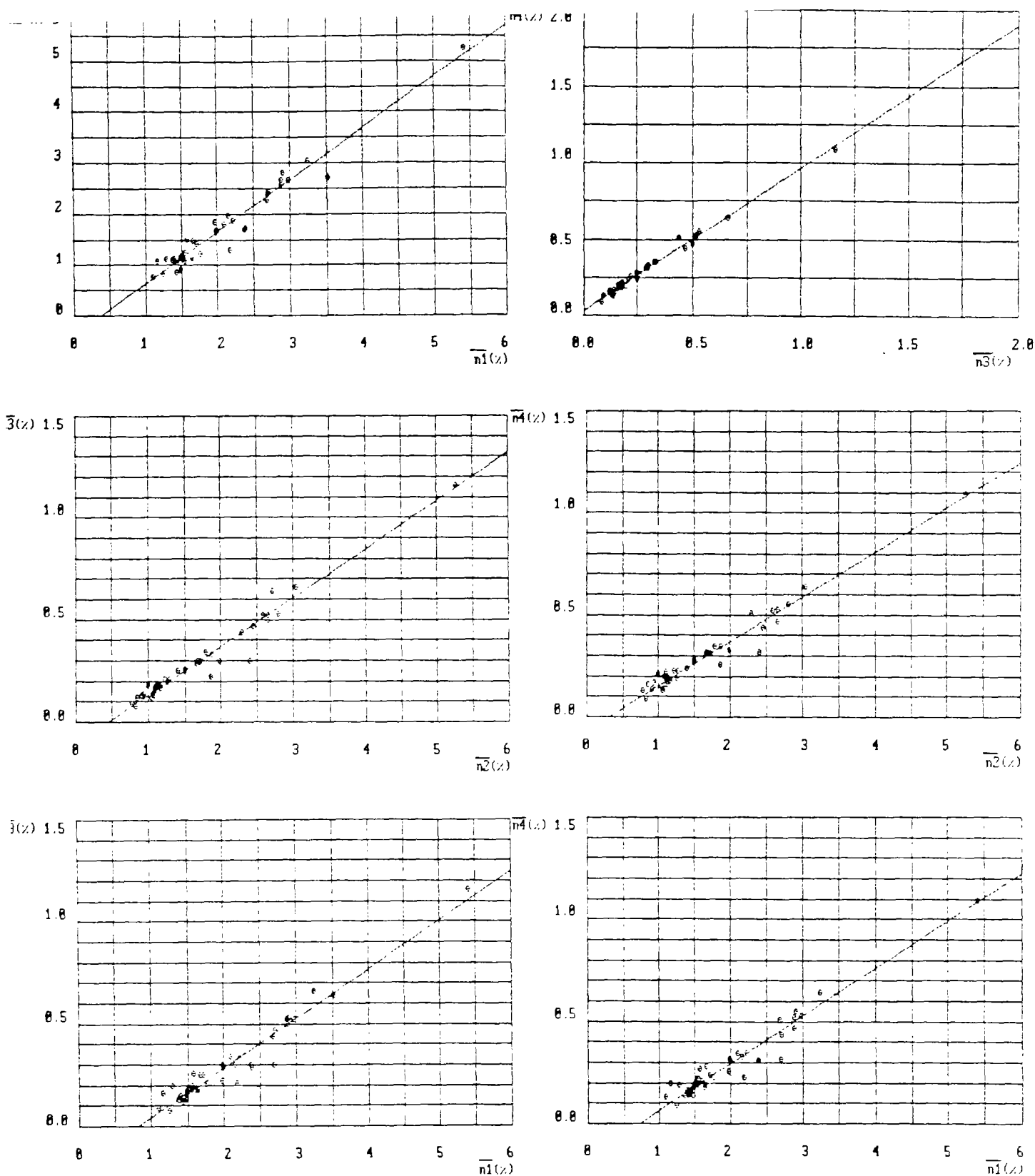
V_{Lair} : vitesse des ondes L dans l'air.



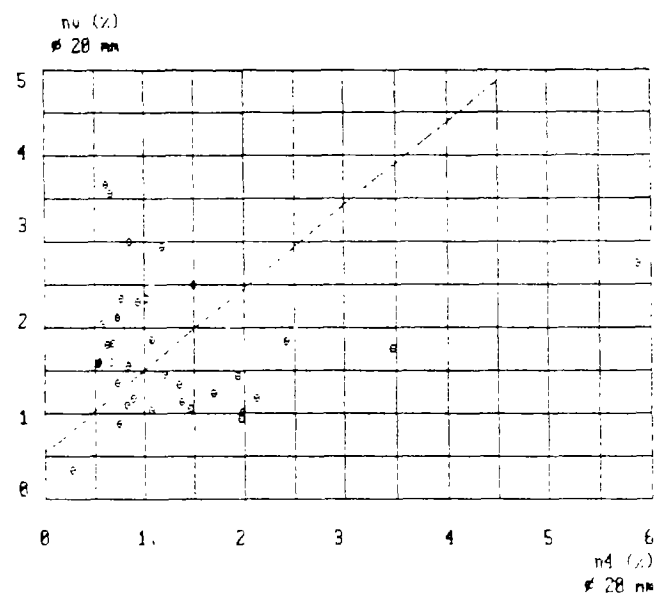
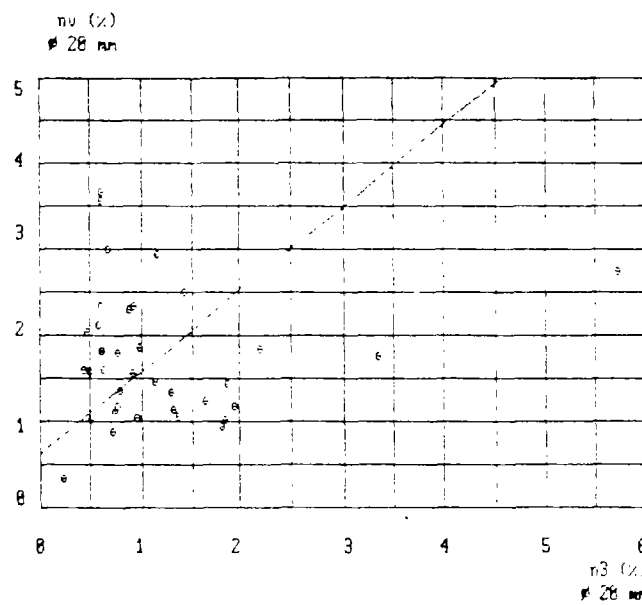
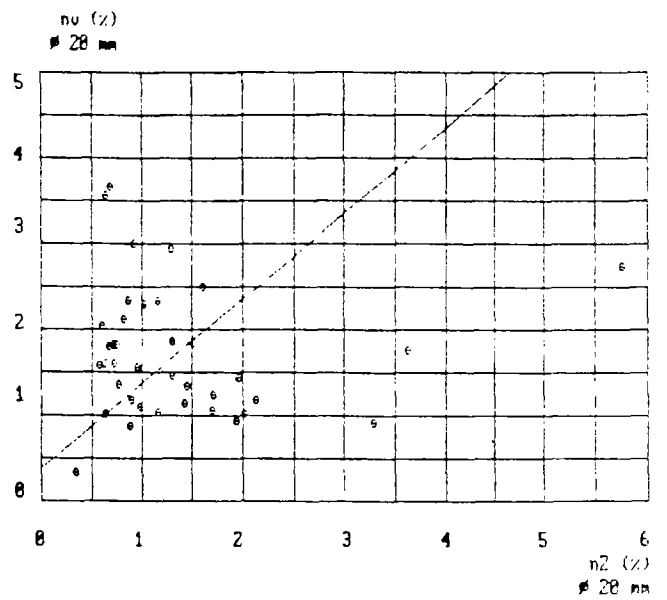
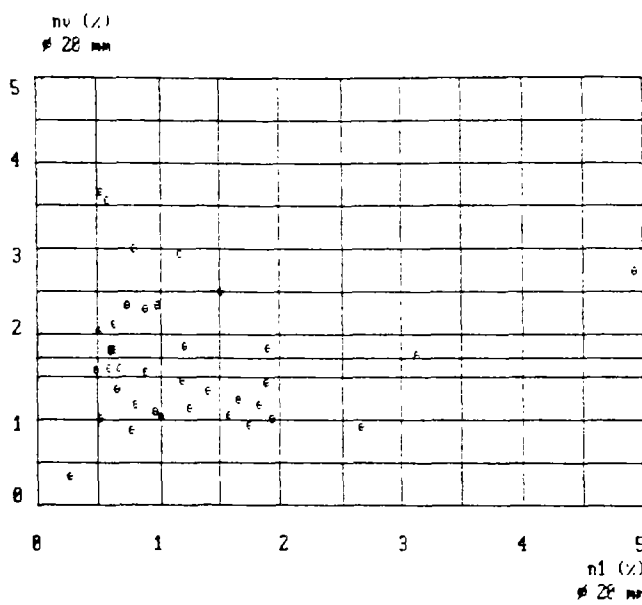
Relation entre les porosités où le poids humide a été déterminé après essuyage suivant différentes méthodes (éprouvettes $\phi = 20$ mm et $H = 40$ mm).



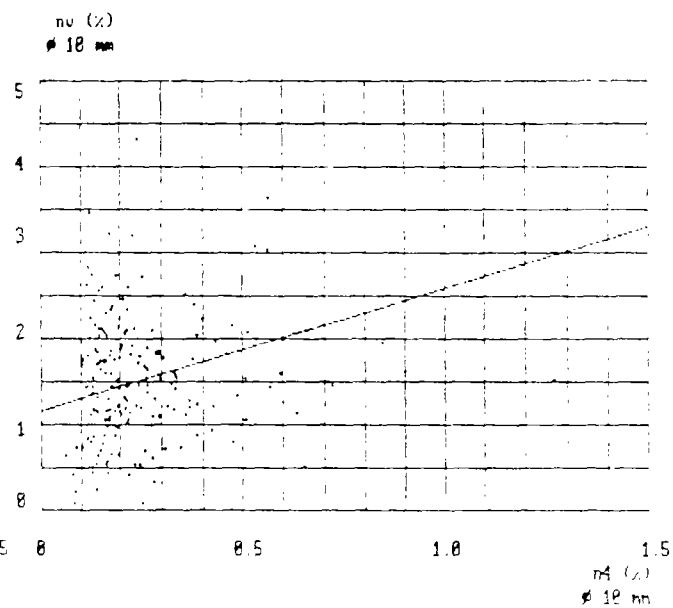
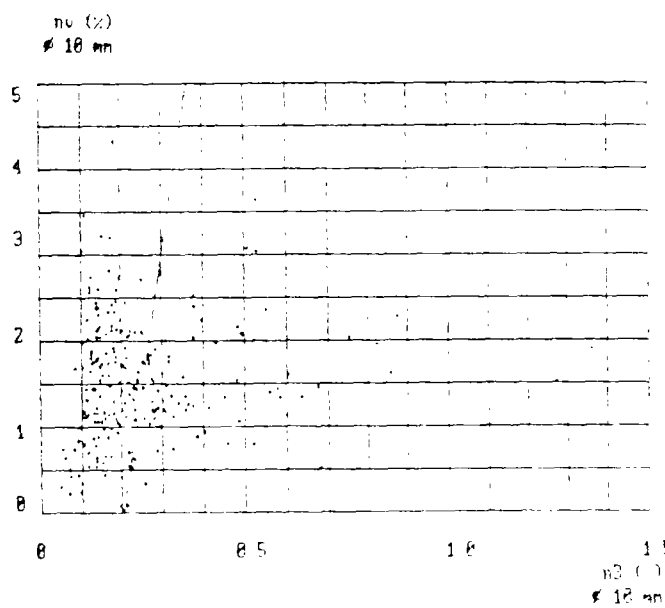
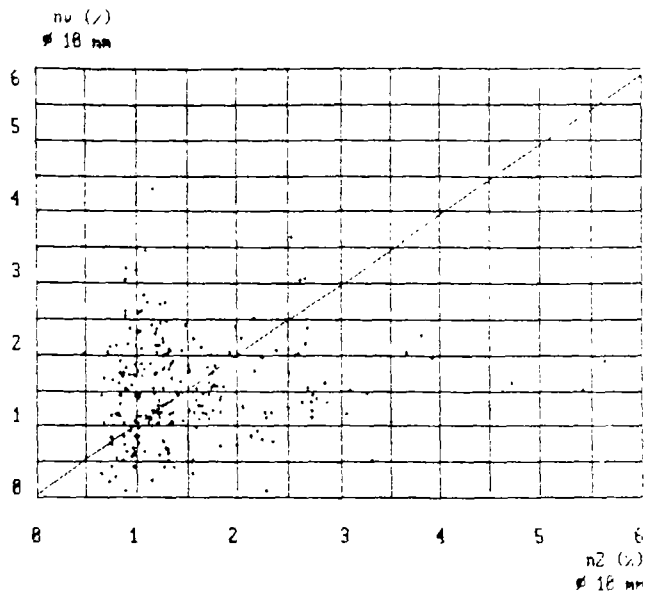
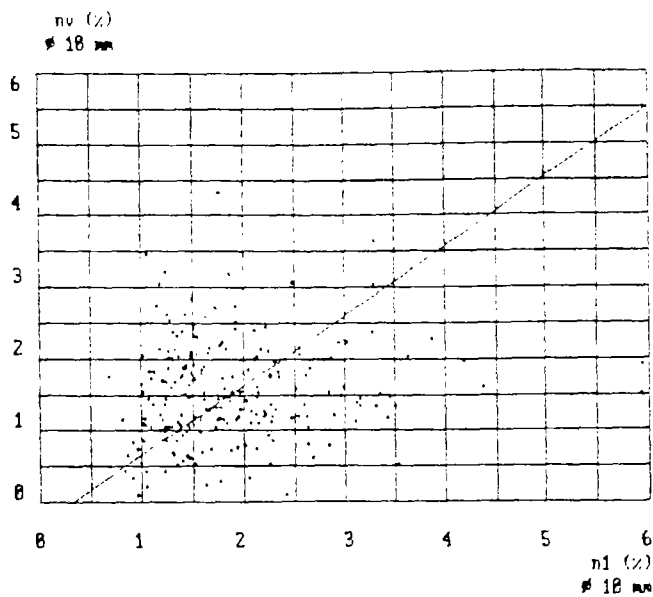
Relation entre les porosités où le poids humide a été déterminé après essuyage suivant différentes méthodes (éprouvettes $\phi = 10$ mm et $H = 20$ mm).



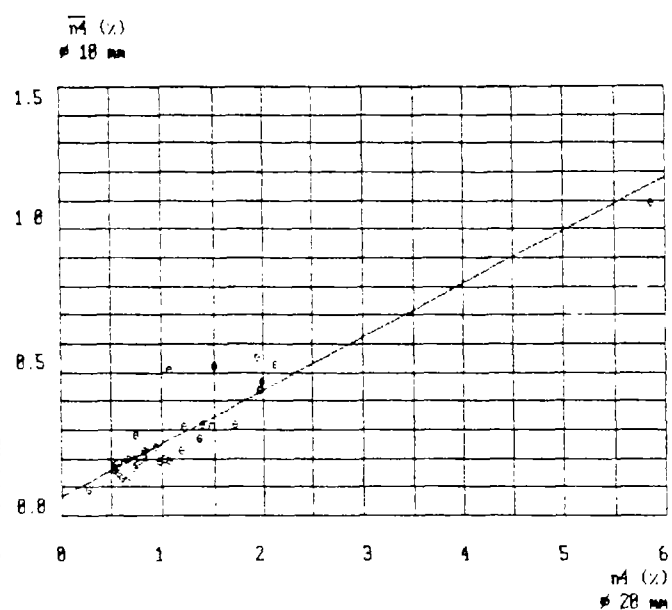
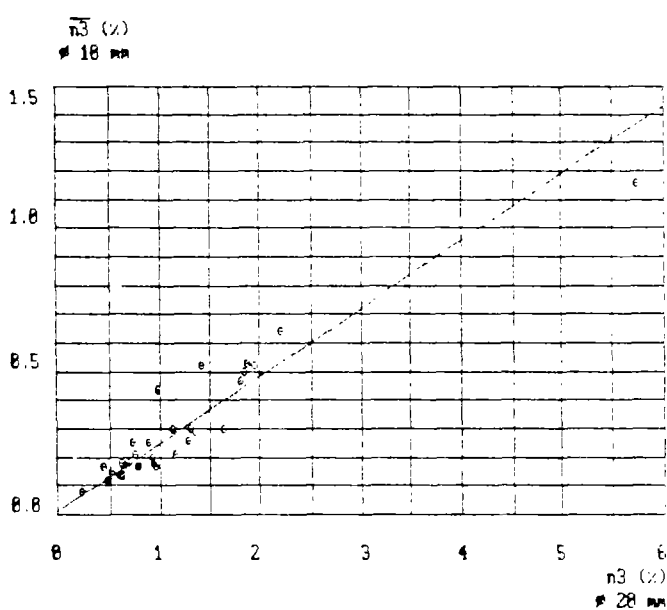
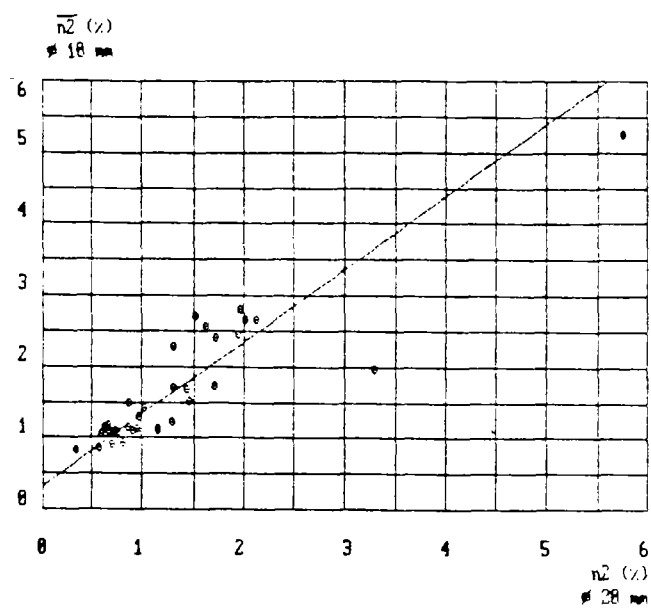
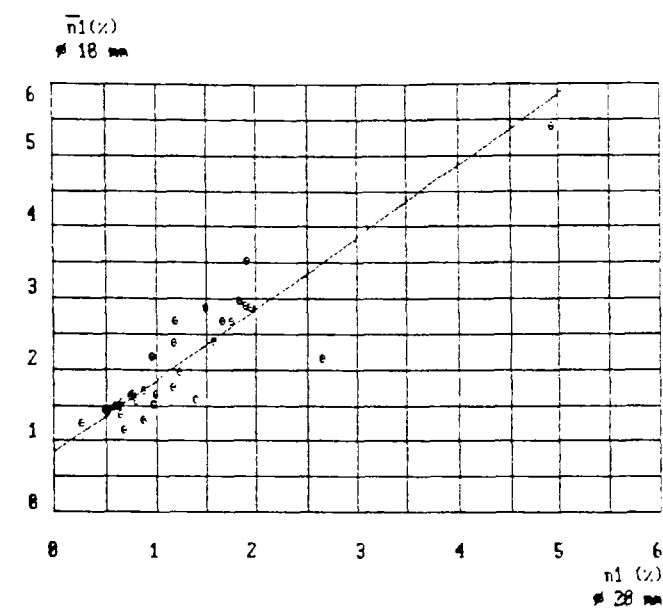
Relation entre les propriétés moyennes et la grande longueur d'onde de la lumière (pour les matériaux étudiés) selon différentes méthodes (épaisseur = 10 nm et $\lambda = 10 \text{ nm}$).



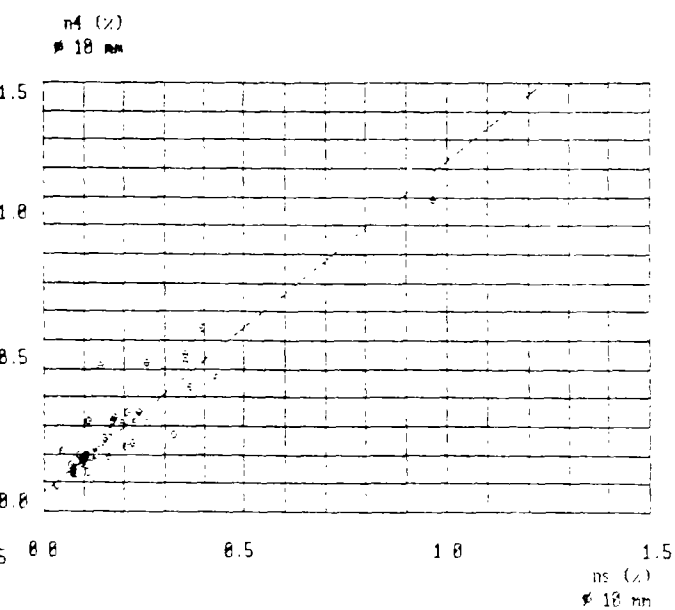
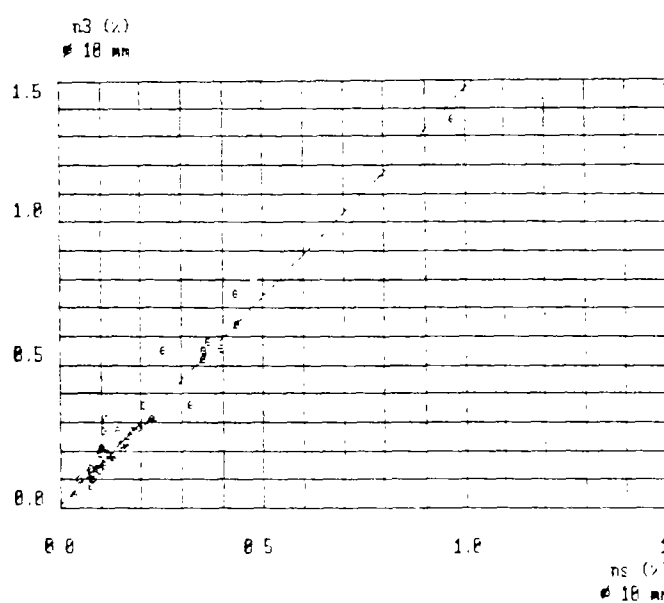
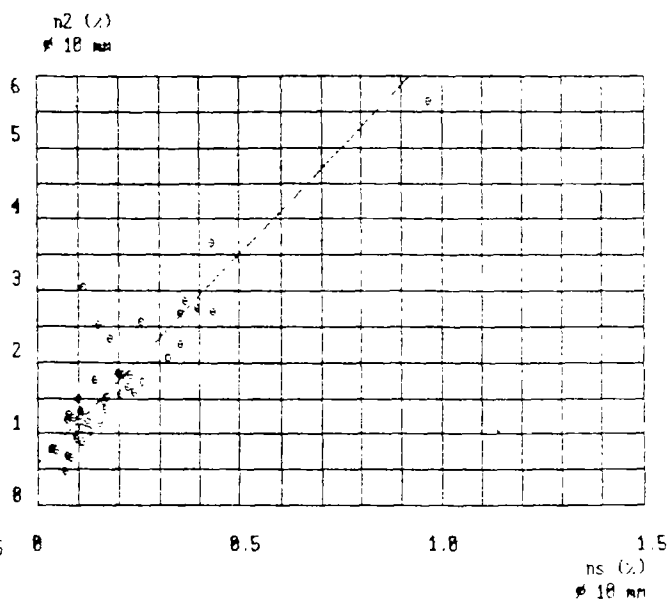
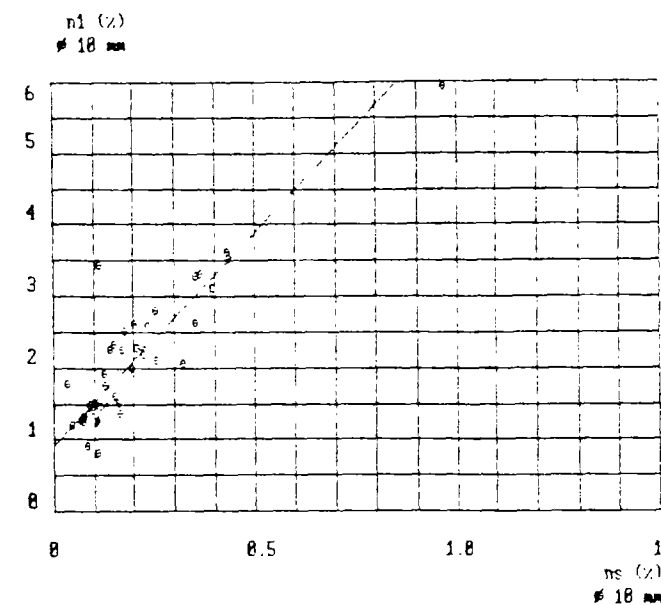
Relation entre les porosités où le poids humide est déterminé après essuyage et celles calculées à partir de la vitesse de propagation des ondes L (éprouvettes $\phi = 20$ mm et $H = 40$ mm).



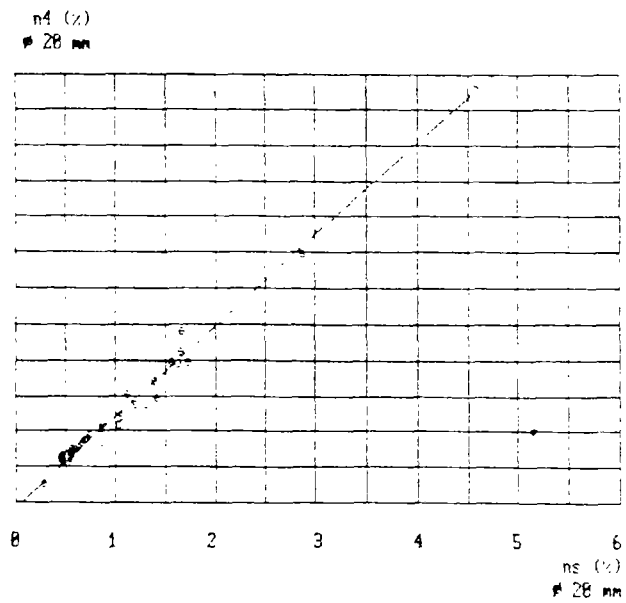
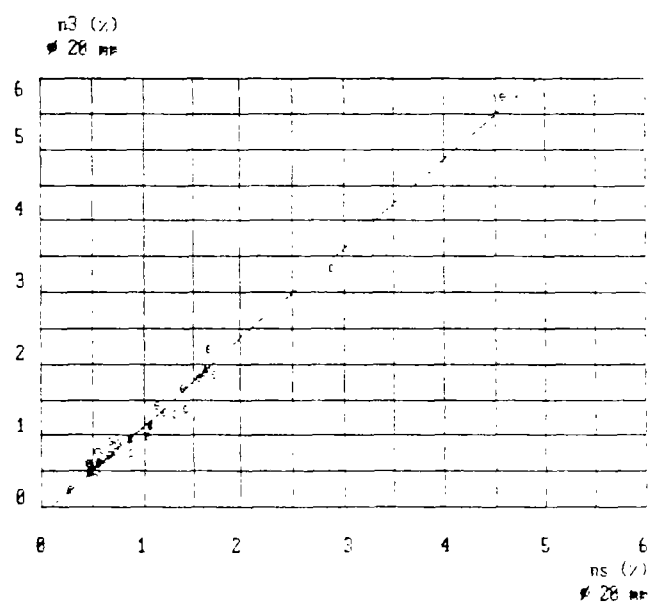
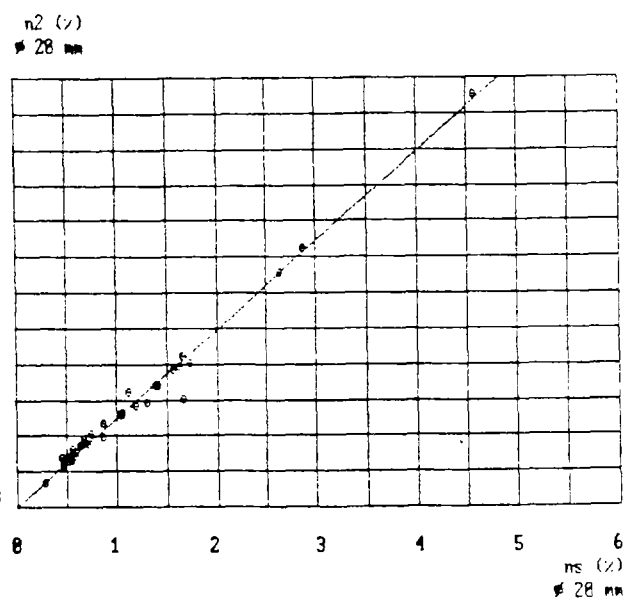
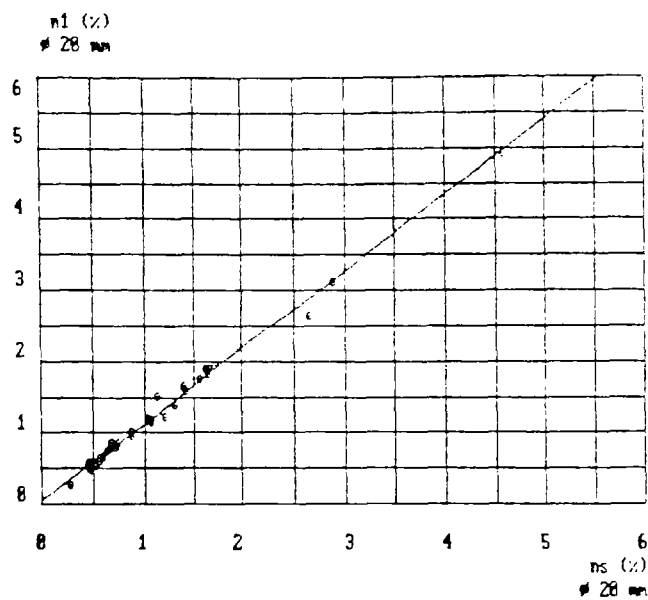
Relation entre les porosités où le poids humide est déterminé après essuyage et celles calculées à partir de la vitesse de propagation des ondes L (échantillons : Ø 18 mm et H = 20 mm).



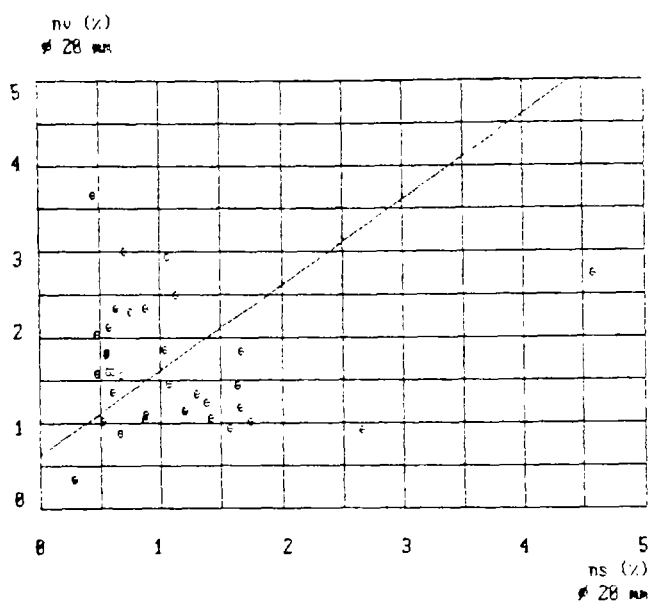
Relation entre les porosités (moyennes) où le poids humide a été déterminé après essuyage suivant différentes méthodes (éprouvettes $\phi = 10$ mm et $H = 20$ mm).



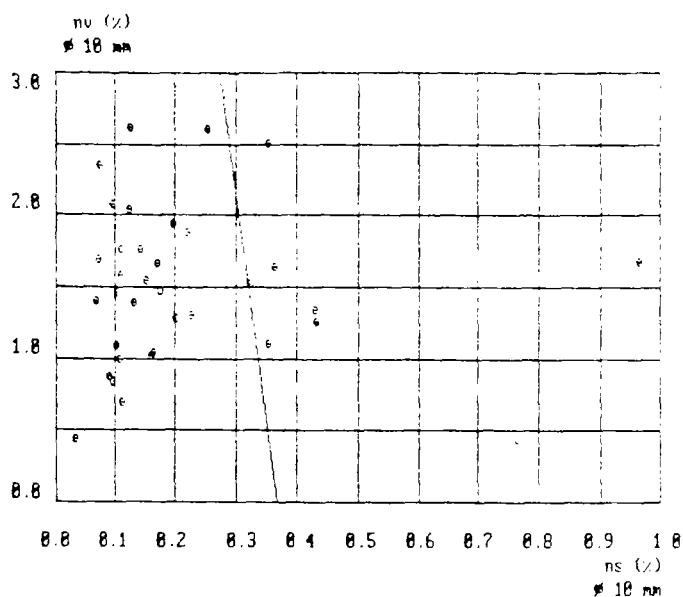
Relation entre les porosités déterminées à partir des courbes de séchage et celles où le poids humide a été déterminé après essuyage (éprouvettes $\phi = 10$ mm et $H = 20$ mm).



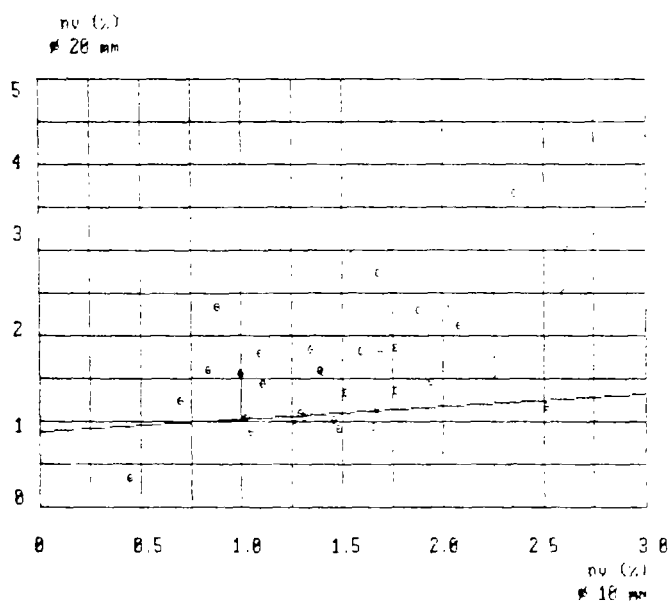
Relation entre les porosités déterminées à partir des courbes de séchage et celles où le poids humide a été déterminé après essuyage (éprouvettes $\phi = 20$ mm et $H = 40$ mm).



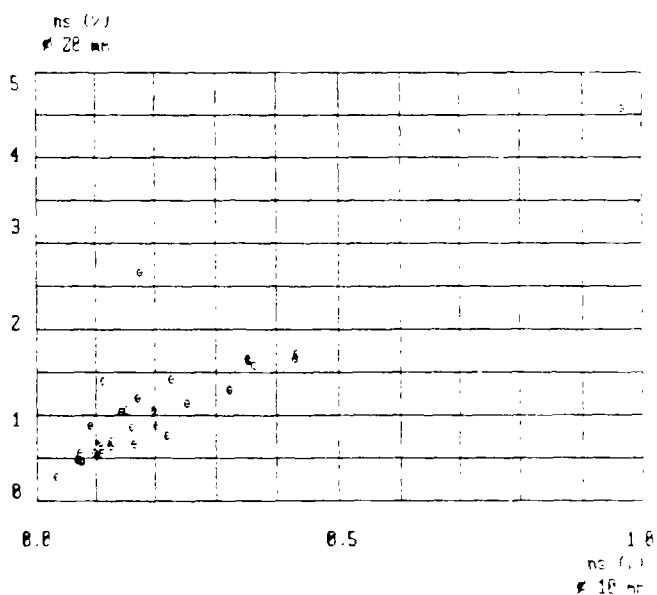
Relation entre les porosités calculées à partir de VL et déterminées à partir des courbes de séchage (éprouvettes $\phi = 20 \text{ mm}$; $H = 40 \text{ mm}$)



Relation entre les porosités calculées à partir de VL et déterminées à partir des courbes de séchage (éprouvettes $\phi = 10 \text{ mm}$; $H = 20 \text{ mm}$)



Relation entre les porosités déterminées à partir de VL pour les 2 tailles d'éprouvette.



Relation entre les porosités déterminées à partir des courbes de séchage (les 2 tailles d'éprouvette).

MODE OPERATOIRE

*Essai de mesure de la compressibilité de roches
avec le porosimètre Carlo Erba*

AVERTISSEMENT :

Ce mode opératoire détaillé a été mis au point avec le matériel du CGI (Paris). Il ne contient aucune explication théorique et peut être appliqué directement par le technicien.

MODE OPERATOIRE
Essai de mesure de la compressibilité
avec le porosimètre Carlo Erba

1 - Préparation de l'échantillon :

Séchage de l'échantillon.

1.1 - Mettre l'échantillon à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant.

1.2 - Soir 1 - Sortir l'échantillon de l'étuve et le mettre immédiatement à refroidir dans un dessiccateur. Laisser refroidir une nuit pour des échantillons de granite cylindrique de diamètre maximum 20 mm et d'éclatement 2.

Imbibition se référer à la figure N° 1.

1.3 - Matin 2 - Enlever le couvercle de la cloche à vide et y placer l'échantillon (configuration 1). La cloche à vide doit-être parfaitement sèche. Remettre le couvercle dont le rodage est préalablement enduit de graisse aux silicones.

1.4 - Placer le robinet R7 en diagonale de manière à isoler la cloche à vide.

1.5 - Fermer le robinet R10 d'arrivée de l'eau permutée.

1.6 - Fermer les robinets R1, R2, R3, R4, R5, R6

1.7 - Démarrer la pompe à vide en appuyant sur l'interrupteur I1.

1.8 - Attendre que le manomètre M2 indique 760 mm puis ouvrir le robinet R4.

1.9 - Attendre que le manomètre M2 indique 760 mm puis ouvrir le robinet R7.

1.10 - Soir 2 (2 heures avant de partir) - S'assurer que le robinet R2 est fermé. Ouvrir le robinet R9.

1.11 - Ouvrir le robinet R1. Attendre que le niveau du mercure dans le manomètre M1 atteigne la graduation 0. Placer le robinet R7 en diagonale de façon à isoler la cloche à vide.

1.12 - Fermer le robinet R4 puis arrêter la pompe à vide en appuyant sur l'interrupteur I1.

1.13 - Ouvrir le robinet R6 puis le robinet R7.

1.14 - Ouvrir le robinet R10 et laisser couler l'eau goutte à goutte jusqu'à ce que l'eau recouvre l'échantillon de plusieurs centimètres (5 cm par exemple).

1.15 - Avant de partir le Soir 2 placer le robinet R7 en diagonale de façon à isoler la cloche à vide. Fermer successivement les robinets R6, R2 et R9.

1.16 - **Matin 3** - Fermer le robinet R2 puis ouvrir le robinet R9.

1.17 - Ouvrir le robinet R6 et attendre que le mercure atteigne la graduation 0. Ouvrir le robinet R7.

1.18 - **Soir 3** - Placer le robinet R7 en diagonale de façon à isoler la cloche à vide. Ouvrir le robinet R2 puis fermer le robinet R9.

1.19 - Ouvrir le robinet R5.

1.20 - Replacer de manière progressive le robinet R7 en position verticale.

1.21 - Retirer le robinet R7 puis le couvercle de la cloche à vide.

1.22 - Laisser le tout tel quel une semaine au moins. Les échantillons seront disponibles au plus tôt le - **Matin 10** -

2 - Préparation du dilatomètre :

Séparation de la cellule et du capillaire du dilatomètre (se référer à la figure N °2).

2.1 - **Matin 10** - Dans le cas où les 2 parties du dilatomètre ne sont pas coincées passer au point 2.2.

2.1.1 - Autant que possible vider le liquide se trouvant dans le dilatomètre en secouant ce dernier au dessus d'un récipient ou d'un évier en prenant les plus extrêmes précautions :

- Attention à ne pas cogner le dilatomètre contre le rebord de l'évier.
- Un geste trop brusque peut entraîner la projection de l'échantillon contre les parois internes du dilatomètre et par conséquent ,le briser.

2.1.2 - Allumer le bec Bunsen et régler la virole afin que la flamme soit bleue.

2.1.3 - Passer le col rodé du dilatomètre dans la partie bleue de la flamme tout en le faisant tourner autour de son axe et en lui appliquant un effort de torsion. Ne pas insister en cas de résistance : un séjour prolongé du dilatomètre dans la flamme pourrait endommager ce dernier.

Nettoyage du dilatomètre.

2.2 - Nettoyer la cellule du dilatomètre à l'aide d'un chiffon doux imbibé de trichloréthylène. Renouveler l'opération jusqu'à ce qu'il ne subsiste plus aucune trace.

2.3 - Rincer la cellule avec de l'alcool absolu.

2.4 - Essuyer soigneusement la cellule avec un chiffon doux, sec et propre. Il ne doit rester aucune trace sur les parois de la cellule.(en particulier de graisse haute pression et de graisse aux silicones).

2.5 - Nettoyer l'intérieur du capillaire à l'aide d'une bande de tissu doux imbibé de trichloréthylène. Renouveler l'opération jusqu'à ce qu'il ne subsiste plus aucune trace (en particulier de graisse haute pression et de graisse aux silicones).

2.6 - Rincer abondamment le capillaire avec de l'alcool absolu puis essuyer l'intérieur du capillaire avec une bande de tissu doux et propre. On pourra s'aider d'une tige à condition de ne pas rayer les parois internes du capillaire.

Séchage des microbilles de verre.

2.7 - Remplir un bécher de microbilles de granulométrie 177 - 297 μm , et le mettre à l'étuve jusqu'à poids constant.

Faire la même opération avec des microbilles de granulométrie 63 - 100 μm .

2.8 - Sortir les béchers et les laisser refroidir dans un grand dessiccateur.

Pesée et mise en place des billes de verre dans la cellule du dilatomètre (se référer à la figure N° 7.

Remarque : toutes les pesées devront être effectuées avec la balance Mettler AE 166 avec une précision au 1/10 de milligramme.

2.9 - Vérifier les réglages de la balance, c'est à dire :

2.9.1 - Vérifier que la stabilité de la balance à l'aide du niveau à bulle NB. Dans le cas où la bulle est excentrée, agir sur les molettes M afin de la recentrer.

2.9.2 - Vérifier que les coupelles C sont remplies de gel de silice de couleur bleue. Dans le cas contraire, y pourvoir.

2.10 - Sortir du dessiccateur le bécher contenant les microbilles de granulométrie 100 μm > ϕ > 63 μm . Remplir le verre à bec verseur V avec les microbilles et remettre le bécher dans le dessiccateur.

2.11 - Poser le support S se composant d'un bouchon BO et d'un joint torique T sur le plateau P, puis placer la cellule du dilatomètre sur le support.

2.12 - Fermer les portes et faire le zéro en appuyant sur la barre B.

2.13 - Ouvrir la porte vitrée H de la balance (porte supérieure).

2.14 - Placer le porte entonnoir PE au dessus de la balance comme indiqué sur la figure N° 7.

2.15 - Placer l'entonnoir E parfaitement propre sur le porte entonnoir PE comme indiqué sur la figure 7. On prendra soin de faire glisser le tube de l'entonnoir E dans le col du dilatomètre en évitant tout contact.

2.16 - Verser le contenu du verre à bec verseur V dans l'entonnoir E en imposant un très faible débit jusqu'à 26.0000 g \pm 0.0002 g.

2.17 - Enlever délicatement l'entonnoir E de son support PE. Fermer la porte vitrée H de la balance.

2.18 - Ouvrir une des portes latérales de la balance et enlever à l'aide d'un pinceau propre et fin les éventuelles microbilles qui se trouvent sur le plateau P.

2.19 - Rajouter des microbilles jusqu'à 28.7000 ± 0.0002 g en s'aidant d'une spatule de chimie ayant une extrémité en forme de cuillère.

2.20 - Une fois le poids voulu atteint, noter la valeur exacte du poids des microbilles présentes dans la cellule puis faire le zéro en appuyant sur la barre B.

2.21 - Reitérer les points 2.10 à 2.20 en remplaçant 26.0 ± 0.2 g par 56.5 ± 0.2 g et 28.7000 ± 0.0002 g par 57.3000 ± 0.0002 g.

2.22 - Sortir la cellule du dilatomètre et la poser sur un support SC. Passer la spatule de chimie à l'alcool absolu et bien l'essuyer. Se servir de cette spatule pour mélanger les microbilles dans la cellule du dilatomètre. On prendra le soin de tapoter légèrement la spatule sur le col de la cellule pour récupérer les microbilles qui pourraient rester accrochées.

2.23 - Placer le bouchon grillagé BG parfaitement propre et sec sur le col du dilatomètre.

Préparation de la cloche à vide (se référer à la figure N° 3).

2.23 - Pour chaque manipulation suivre les étapes suivantes :

2.23.1 - Nettoyer et sécher la cloche à vide ainsi que tous les éléments qui y sont contenus.

2.23.2 - Démonter l'arrivée de NaOH 10^{-1} et désolidariser le bec en verrerie, sécher puis remonter l'ensemble.

2.23.3 - Placer les six boulons au fond de la cloche à vide comme indiqué sur la figure. Poser le disque en verre sur les boulons. La face dépolie du disque doit-être orientée vers le haut.

2.23.4 - Placer l'ensemble support dilatomètre sous le bec en verrerie d'arrivée de NaOH.

2.23.5 - Placer les deux boîtes en plastique transparent, en position verticale autour de l'ensemble support dilatomètre, et parallèlement à l'arrivée de NaOH.

Placer le cristalliseur en équilibre sur les 2 boîtes en plastique, en positionnant sa partie creuse vers le bas.

Remplissage du dilatomètre (se référer à la figure N° 3).

2.24 - Replacer le couvercle de la cloche à vide dûment enduit de graisse aux silicones.

2.25 - Placer le robinet R7 en position diagonale et fermer le robinet R8.

2.26 - Remplir la burette avec la solution NaOH 10^{-1} N. (pour préparer cette solution peser 4.0000 g de NaOH NORMAPUR PROLABO en pastilles et les diluer dans 1000 ml d'eau permutée. On utilisera comme récipient une fiole jaugée).

2.27 - Réitérer les opération décrites du point 1.6 au point 1.13.

2.28 - Ouvrir délicatement le robinet R8 et le refermer dès que le niveau du liquide atteint la petite section de la burette. Emplir à nouveau la burette avec la solution de soude 10^{-1} N. La solution doit couler goutte à goutte autant que possible. Répéter cette opération jusqu'à ce que le dilatomètre soit rempli de solution mais sans que celle-ci ne déborde.

2.29 - Soir 10 - Réitérer le point 1.15.

2.30 - Matin 11 - Réitérer les opérations décrites du point 1.18 au point 1.21.

Mise en place de l'échantillon dans le dilatomètre.

2.31 - Graisser le col rodé du capillaire avec la graisse haute pression de marque "Apiezon". Étaler la graisse sur toute la surface du col tout en prenant garde de ne pas en faire pénétrer dans les rainures du col (fig. N° 2).

2.32 - Prendre l'ensemble cellule du dilatomètre - support et le poser dans un grand bœcher propre et sec.

2.33 - Se saisir du 1^{er} l'échantillon saturé avec une pince et le faire entrer le plus profondément possible dans la cellule du dilatomètre. Il faut éviter à tout prix de laisser déborder la solution et, surtout, de perdre une fraction des billes de verre. On s'aidera d'une fine spatule pour faire pénétrer l'échantillon dans le dilatomètre.

2.34 - Réitérer la même opération avec le 2^{ème} échantillon.

2.35 - Placer avec soin le capillaire sur la cellule en imprimant un mouvement tournant pour étaler et répartir la graisse sur la surface de contact que constitue le rodage.

2.35 - La solution monte dans le capillaire lors de l'opération décrite au point précédent (2.18), mais il se peut que le niveau n'atteigne pas le 2^{ème} repère (ce problème ne se pose pratiquement jamais avec les capillaires de petit diamètre). Dans ce cas, récupérer la solution désaérée se trouvant au fond du bœcher et compléter en remplissant par l'orifice sommital du capillaire.

2.36 - Essuyer très soigneusement les parois extérieures du dilatomètre.

2.37 - Placer la pièce B sur le col du dilatomètre et placer le joint C comme indiqué sur la figure N° 1. Visser la pièce A sur la pièce B. Ce dispositif permet de bloquer parfaitement les deux pièces du dilatomètre.

3 - *Mise en place du dilatomètre dans l'autoclave (se référer à la figure N° 4).*

3.1 - Enlever le robinet R13.

3.2 - Dévisser la bague de serrage F et l'enlever.

3.3 - Désolidariser le foureau D du bloc de verrouillage H.

3.4 - Retirer la partie supérieure de l'autoclave.

3.5 - Passer un jet d'alcool absolu sur l'extérieur du dilatomètre, en s'aidant de la pissette. Attention de ne pas faire entrer de l'alcool à l'intérieur du dilatomètre.

- 3.6 - Placer le dilatomètre dans la partie fixe de l'autoclave.
- 3.7 - Recouvrir le dilatomètre avec un b cher en aluminium. Attendre 30 mn.
- 3.8 - Remplir successivement les seringues d'alcool et d'huile aux silicones 47V20. On prendra soin d'évacuer les bulles d'air résiduelles.
- 3.9 - Préparer des m ches de papier absorbant. Ajuster le ménisque au 2   repère du capillaire.
- 3.10 - Sécher avec une m che sèche la paroi surplombant la surface libre.
- 3.11 - Faire couler goutte à goutte l'huile aux silicones 47V20 en maintenant l'extrémité de l'aiguille très proche de la surface du ménisque et en s'efforçant de viser le centre de la section du capillaire. Il faut absolument éviter de faire couler l'huile aux silicones 47V20 le long des parois du capillaire ou de mettre en contact la seringue avec les parois.
- 3.12 - Finir de remplir le capillaire en faisant couler goutte à goutte l'alcool absolu. On prendra les mêmes précautions que celles décrites au point pr c dent (3.6).
- 3.13 - Dévisser V1 et ouvrir le bloc H.
- 3.14 - S'assurer que le repère rouge se trouvant sur l'unité E de la partie supérieure de l'autoclave n'est pas caché par le fourreau D. Si nécessaire dévisser le fourreau D afin que le repère rouge redevienne visible.
- 3.15 - Placer avec soin la partie supérieure de l'autoclave sur son homologue inférieur.
- 3.16 - Enlever R13 et visser la bague de serrage F sur le filtage G.
- 3.17 - Remettre en place R13 sans le revisser à fond.
- 3.18 - Ouvrir le robinet d'admission d'alcool R11.
- 3.19 - Revisser à fond R13 quand l'alcool commence à fuir.
- 3.20 - Visser le fourreau D de manière à ce que le repère rouge se trouve 1 cm au dessus du repère D.
- 3.21 - Verouiller le bloc H
- 3.22 - Fixer le fourreau D de la partie supérieure de l'autoclave sur le bloc H au niveau de la roue crantée.
- 3.23 - Attendre 30 mn avant de passer au point 4.
- 4 - Montée en pression (se référer aux figures N  4a, 4b, 5a et 5b) :
- 4.1 - Déplier la lame L1 vers la droite.
- 4.2 - Mettre S7 (mouvement aiguille) vers le bas. Le moteur M se met en marche. L'aiguille s'arrête quand elle entre en contact avec la solution de NaOH 10^{-1} N. On effectuera le point 4.3 pendant la descente de l'aiguille.

4.3 - Régler le zéro des manomètres digitaux M4 et M5. Précision :

- M5 : ± 0.1 bar.

- M6 : ± 1 bar.

On vérifiera le calibre de M5 et M6 en appuyant sur les poussoirs I4 et I5 qui devront indiquer respectivement 107.5 et 1630 bars.

4.4 - Fermer à fond le robinet R12 et vérifier que R11 et R13 sont bloqués.

4.5 - Mettre à zéro le compteur C1 en appuyant sur I2.

4.6 - Mettre l'imprimante thermique sous tension si cela n'est pas déjà fait.

4.7 - Vérifier qu'il reste assez de papier dans le magasin de l'imprimante. Pour faire avancer le papier, mettre le bouton poussoir I3 en position basse.

4.8 - Initialiser l'imprimante en mettant le bouton poussoir I3 en position haute.

4.9 - Mettre le bouton S2 en position haute.

4.10 - Mettre le bouton S3 de mise en pression en position basse. L3 s'allume.

4.11 - Appuyer sur le poussoir ON de mise en pression. L4 s'allume.

Remarque : la durée de l'essai varie avec la hauteur initiale du ménisque dans le capillaire, la compressibilité du fluide, la taille de l'échantillon et la temporisation choisie. Pour notre série d'essais il faut compter une moyenne de 2 heures pour la montée en pression.

5 - Transition montée en pression - détente (cf.fig.N° 4a, 4b, 5a, 5b) :

5.1 - On vérifiera à intervalle régulier la distance séparant V1 de L1. Quand cette distance n'est plus que de 2 mm attendre que le moteur M se mette en route pour appuyer sur le poussoir OFF. L4 s'éteint.

5.2 - Mettre le bouton poussoir I3 en position Haute.

5.3 - Maintenir le bouton poussoir I3 en position basse jusqu'à ce qu'il défile assez de papier (5 cm environ) pour inscrire les références de l'essai. Lire le nombre inscrit sur le compteur C1.

Noter les références de l'essai dans l'ordre indiqué ci-après :

665	+081.3	1291
666	+081.3	1291
667	+081.3	1297
10/05/1989 AM		
1 ère Montée en pression		
Echantillon N° 102		
667 crans		

5.4 - Appuyer sur le bouton poussoir I2 du compteur C1.

5.5 - Les boutons S3 et S7 ont 3 positions possibles :

- une position haute
- une position intermédiaire
- une position basse

5.5.1 - Mettre le bouton S3 en position intermédiaire. L3 s'éteint.

5.5.2 - Mettre le bouton S7 en position haute. Le moteur M se met en route et l'aiguille remonte.

5.5.3 - Dès que le moteur M et l'imprimante se sont arrêtés, appuyer vers le bas sur le bouton poussoir I3 de l'imprimante afin de faire défiler de 2 à 3 cm de papier.

6 - Détente (cf.fig.N° 4a, 4b, 5a, 5b) :

6.1 - Ouvrir très délicatement le robinet R12, tout en regardant le manomètre M4, de manière à faire chuter la pression à un rythme d'environ 1 bar par seconde. Refermer le robinet dès que le moteur M se met en route.

6.2 - Quand le moteur M et l'imprimante se sont arrêtés réitérer la manipulation décrite en 5.6.

6.3 - Quand les manomètre M4 et M5 se bloquent à des valeurs proches de zéro, ouvrir à fond les robinets R12, puis R13.

6.4 - Réitérer le point 5.3.

6.5 - Dans le cas où l'on enchaîne par un nouveau cycle montée en pression - détente, se reporter au point 7 et suivre les instructions. Dans le cas où l'on a terminé tous les cycles se reporter au point 8 et suivre les instructions.

Remarque : il faut compter 90 mn maximum pour effectuer une détente.

7 - Nouveau cycle montée en pression - détente (cf.fig.N° 4a, 4b, 5a, 5b) :

- 7.1 - Remettre R13 en position sans le visser à fond.
- 7.2 - Ouvrir le robinet d'admission d'alcool R11.
- 7.3 - Revisser R13 quand l'alcool se met à fuir.
- 7.4 - Refermer à fond les robinets R11 puis R12
- 7.5 - Attendre 15 mn.
- 7.6 - Mettre le bouton S7 en position basse. Le Moteur M se met en route et l'aiguille descend de quelques crans.
- 7.7 - Appuyer sur le bouton poussoir I2 du compteur C1.
- 7.8 - Mettre le bouton poussoir I3 en position haute puis le maintenir en position basse et laisser le papier défiler 2 cm.
- 7.9 - Mettre le bouton poussoir S3 mise en pression en position basse. L3 s'allume.
- 7.10 - Appuyer sur le bouton ON de mise en pression. L4 s'allume. Se reporter au point 5 et suivre les instructions.
- 8 - Retrait du dilatomètre du porosimètre (cf.fig.N° 4a, 4b, 5a, 5b) :
 - 8.1 - Mettre le bouton poussoir S7 en position intermédiaire.
 - 8.2 - Mettre le bouton poussoir S2 "Top imprimante" en position basse.
 - 8.3 - Désolidariser le fourreau D du bloc de verouillage H.
 - 8.4 - Dévisser le fourreau D jusqu'à ce que le repère rouge se trouve sous l'extrémité inférieure du fourreau D.
 - 8.5 - Dévisser V1. Déverrouiller le bloc H.
 - 8.6 - Enlever le robinet R8.
 - 8.7 - Dévisser la bague de serrage F. Si nécessaire, s'aider d'un serre joint. Dans ce cas, interposer un chiffon épais entre la bague de serrage et le serre joint
 - 8.8 - Enlever la partie supérieure de l'autoclave en suivant les étapes suivantes :
 - 8.8.1 - Décoincer la partie supérieure de l'autoclave, en faisant un mouvement de dévissage. On prendra soin de doser le mouvement pour éviter que le déblocage soit brusque et entraîne la destruction du dilatomètre.
 - 8.8.2 - Dès que la partie supérieure de l'autoclave est décoinçée, c'est à dire dès que les deux joints toriques sont dégagés, enlever l'ensemble dans un mouvement vertical en évitant de toucher le capillaire.
 - 8.9 - Enlever le dilatomètre de la partie fixe de l'autoclave.
 - 8.10 - Replacer la partie supérieure de l'autoclave sur la partie fixe de l'autoclave.
 - 8.11 - Revisser la bague de serrage F sans forcer.

8.13 - Remettre en place le robinet R13 sans le bloquer.

FIG.1 : DISPOSITIF DE MISE SOUS VIDE

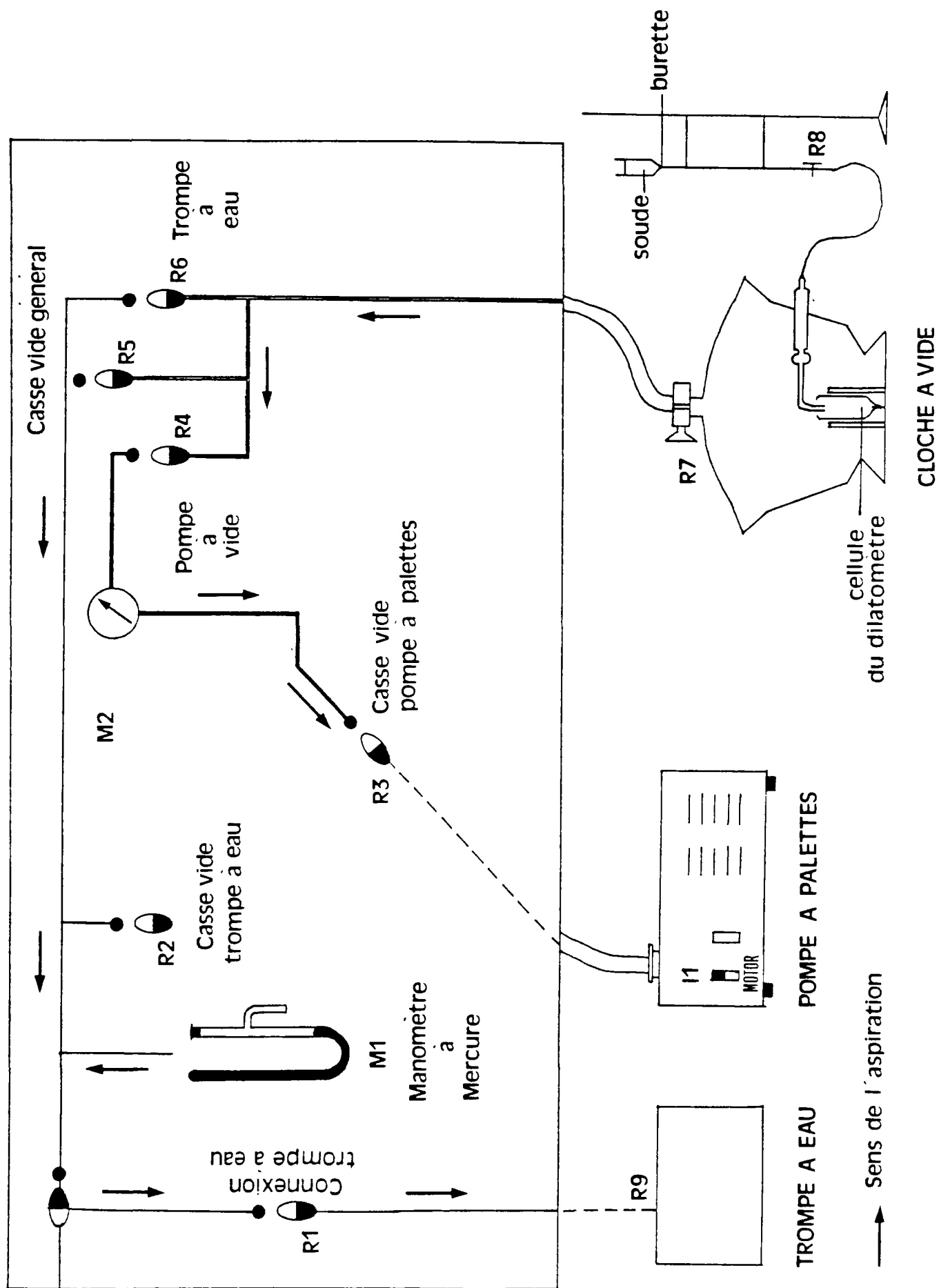


FIG.2: DILATOMETRE

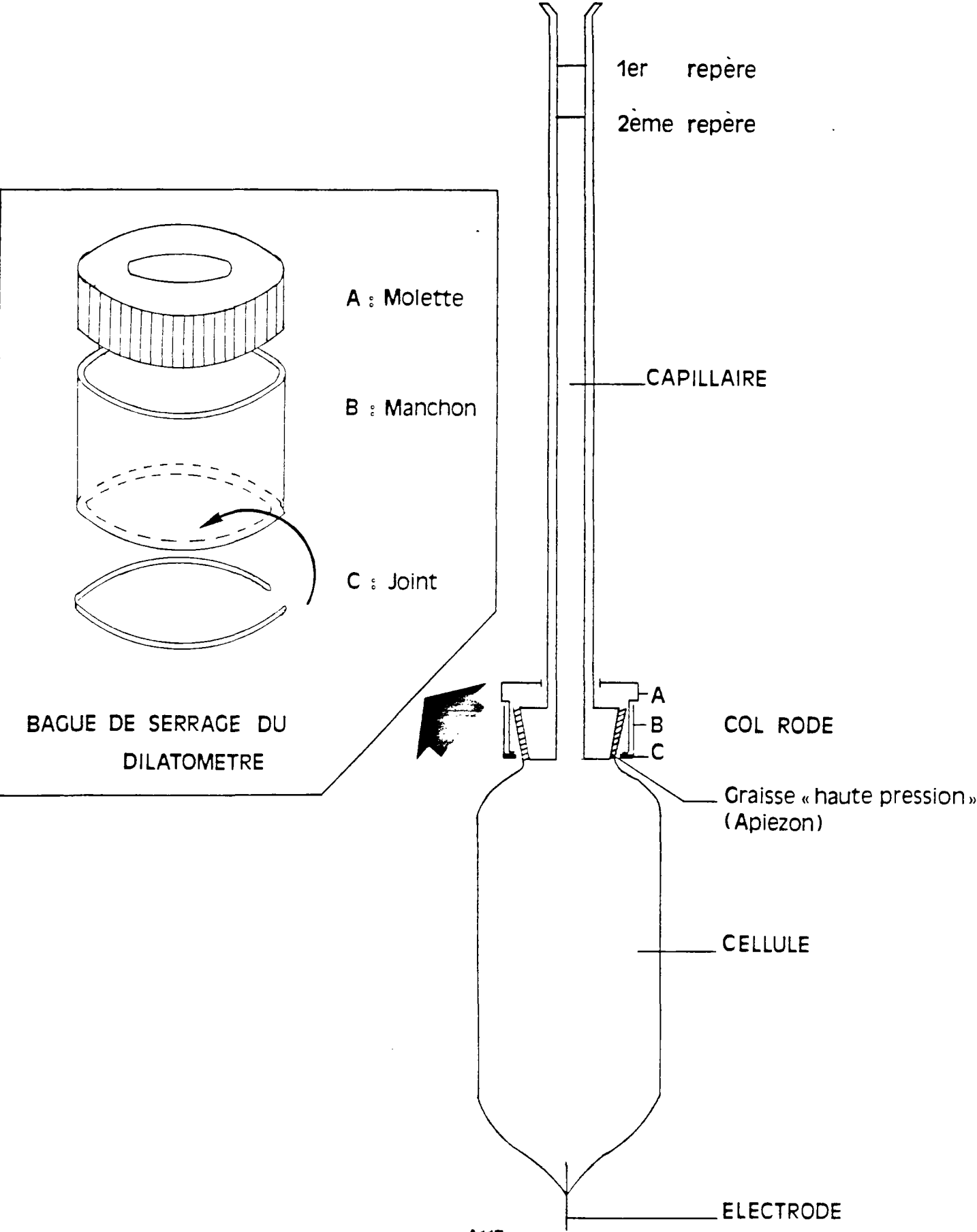
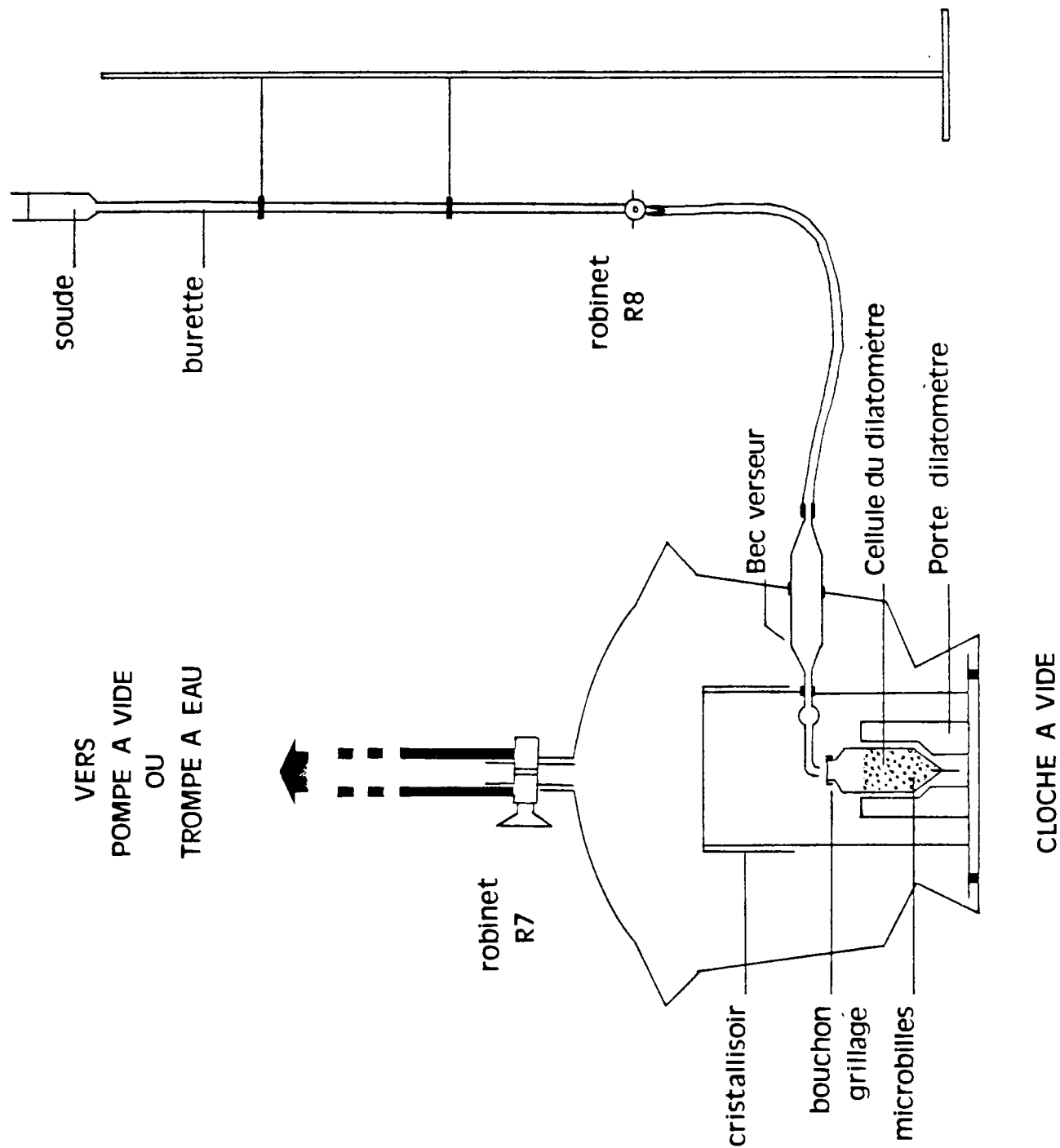


FIG.3 : MISE EN PLACE ET REMPLISSAGE DU DILATOMETRE DANS LA CLOCHE A VIDE



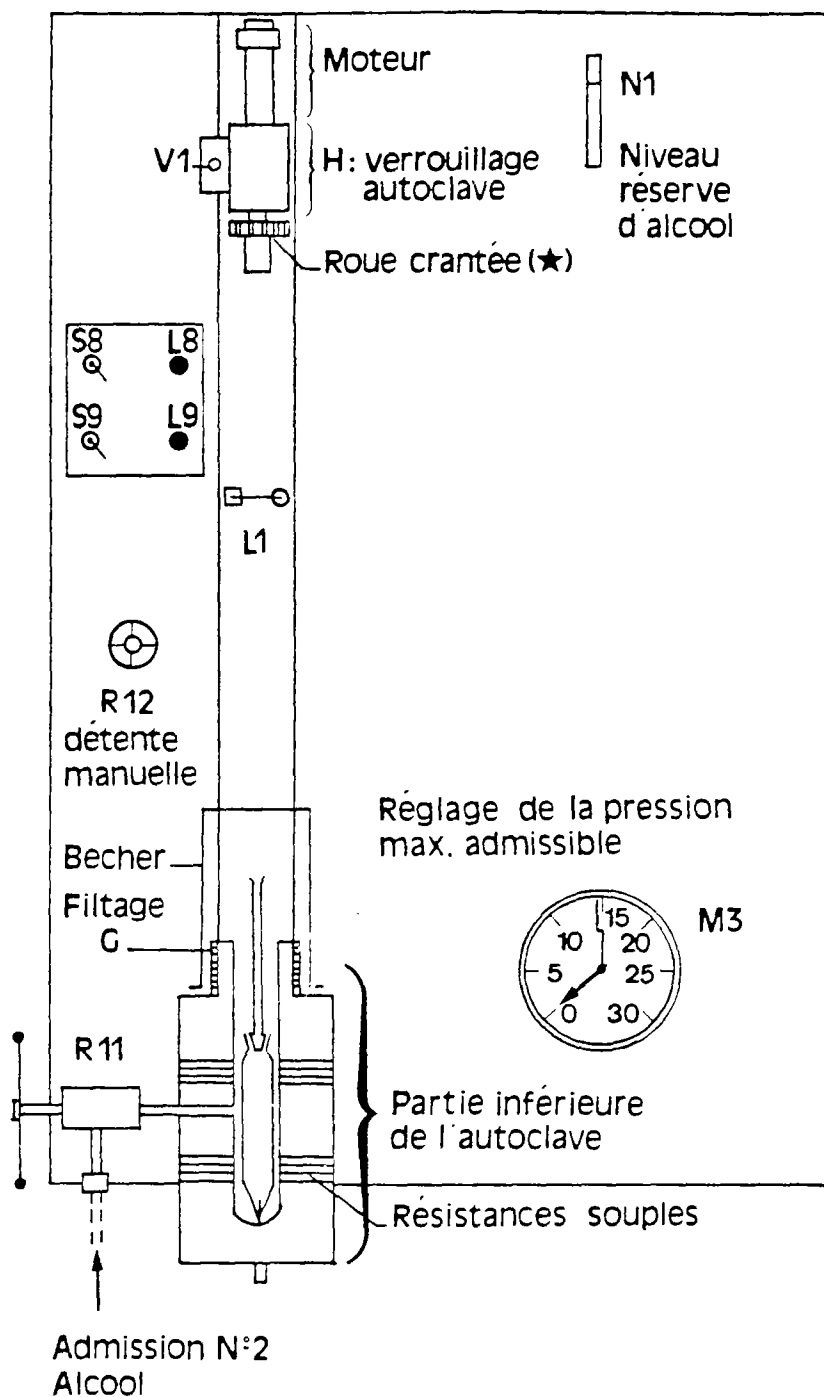


FIG.4.a : FACE LATÉRALE DU POROSIMÈTRE CARLO.ERBA 1500

(★) : 1 CRAN CORRESPOND A UN MOUVEMENT VERTICAL DE L'AIGUILLE DE 0,2 MM

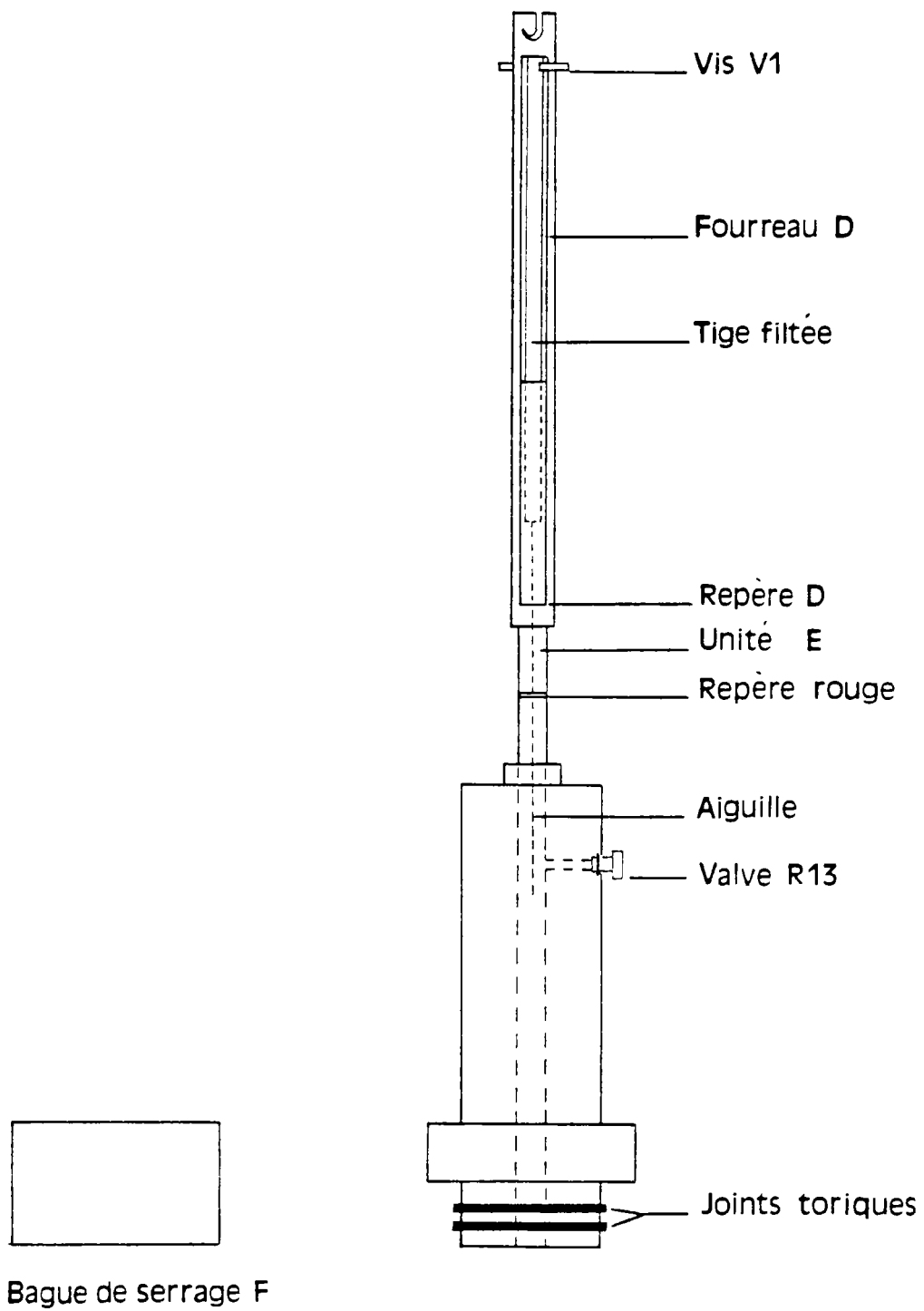


FIG.4.b : PARTIE SUPERIEURE DE L'AUTOCLAVE

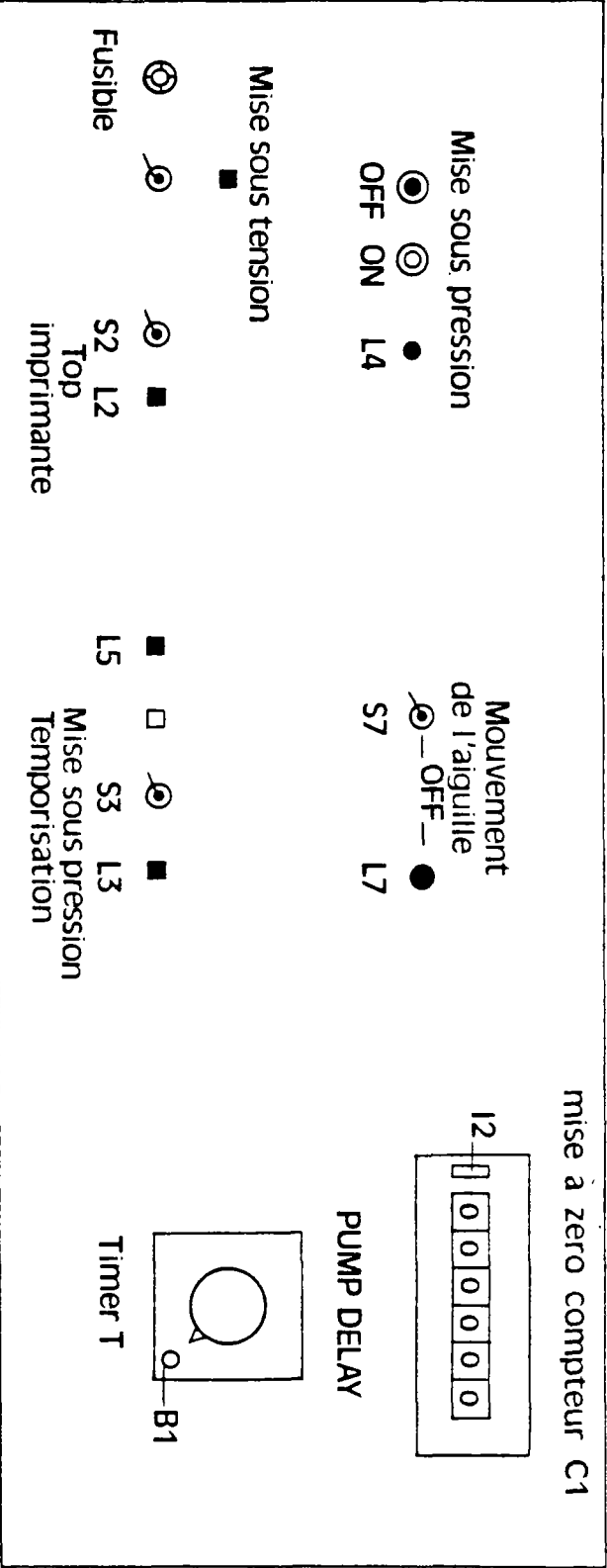
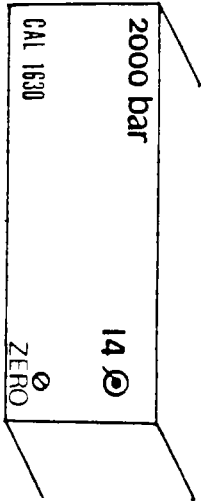
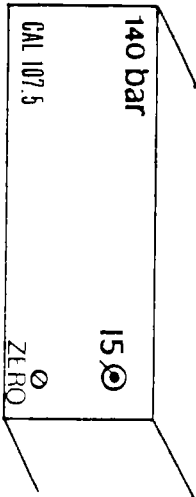


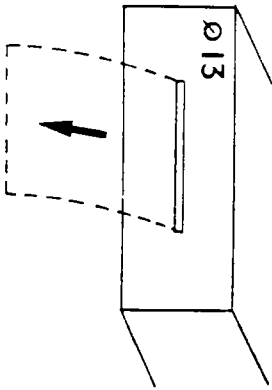
FIG.5.a : Tableau de commande du porosimètre CARLO.ERBA 1500



MANOMETRE M4
HAUTE PRESSION



MANOMETRE M5
BASSE PRESSION



IMPRIMANTE

FIG.5.b: MANOMETRES ET IMPRIMANTE

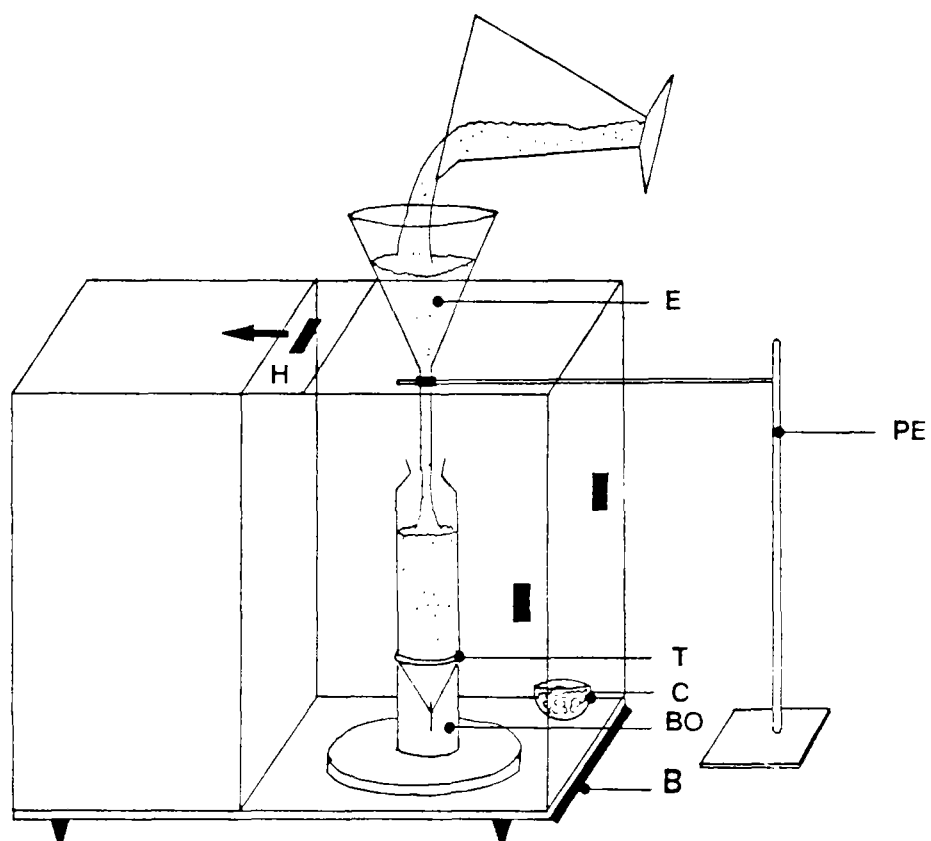


FIG.7: MISE EN PLACE DES MICROBILLES DANS LE DILATOMETRE

RELAGES A NE PAS MODIFIER
(cf. fig. N° 4)

Thermostatisation :

Les deux boutons bleus T1 et T2 doivent être réglés sur 30°C.

Réglage de la limite supérieure de la pression :

Le réglage se fait sur le manomètre M3. La pression limite est indiquée par l'aiguille rouge qui fait office de buttoir. Celle-ci doit être réglée sur 1500 bars.

Temporisation :

A l'aide du bouton B1 on réglera le timer T "PUMP DELAY" sur seconde, puis sur le calibre 1 à 6 secondes.

A l'aide du bouton B2, on réglera l'aiguille sur 5 secondes.

Retard aiguille :

Les boutons poussoirs S8 et S9 doivent être bloqués dans la position basse et les voyants L8 et L9 allumés .

ENTRETIEN

Vérifier régulièrement :

1) Le niveau d'huile de la pompe N2.

Type d'huile : L.H.S.2 - "liquide spécial pour circuits de suspension Citroën" - TOTAL -

2) Le niveaux d'alcool absolu N1 (cf. fig.N° 4a).

3) Nettoyer régulièrement la pointe aiguisée de l'aiguille. Pour cela, visser à fond le fourreau D (cf.fig.N° 4b) de façon à ce que la pointe de l'aiguille ressorte par l'extrémité inférieure.

4) Vérifier régulièrement l'état des joints toriques J1 et J2, (cf fig.N° 4b) et les remplacer si nécessaire. Le joint J1 s'usant plus rapidement que J2, on mettra J2 à la place de J1 et on remplacera J1 par un joint neuf.

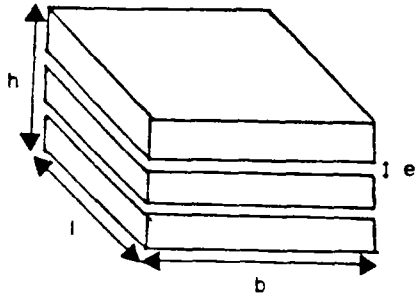
5) Toujours avoir en réserve une quantité raisonnable de microbilles prêt à l'usage dans un dessicateur (un b cher de 500 ml pour chaque type de microbilles).

6) Toujours avoir en réserve une quantité raisonnable de NaOH 10^{-1} M (1000 ml par exemple).

ANNEXE 5

**Détermination des surfaces spécifiques
Détail des calculs**

1ère modélisation : mouvement parallèle, isotherme et permanent d'un fluide visqueux, incompressible, dans une fissure d'épaisseur e .



La fissure est supposée s'étendre indéfiniment dans le plan horizontal x, y et son ouverture est orientée selon z . L'écoulement parallèle se fait dans la direction x : la vitesse a une seule composante V_x . On a $V_x = V_x(z)$.

$$\begin{cases} V_x = V_y = 0 \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

* Equations simplifiées de Navier-Stokes :

Equation de Navier-Stokes :

$$\vec{\text{grad}} p - \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \cdot \vec{\text{grad}} (\text{div } \vec{V}) - \rho \Delta \vec{V} = \rho \cdot (\vec{F} - \vec{V})$$

Hypothèses :

- En régime permanent : $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$

- L'équation de continuité : $\text{div} (\rho \cdot \vec{V}) = - \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

et avec un fluide incompressible : $\text{div } \vec{V} = 0$ ($\rho = \text{constante}$)

On a donc $\vec{\text{grad}} p - \mu \Delta \vec{V} = \vec{F}$

Soit en projection sur les 3 axes et sans action des forces extérieures ($\vec{F} = 0$) :

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} & (1) \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 & (2) \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0 & (3) \end{cases}$$

On isole suivant l'axe x, une longueur l de fissure, et suivant l'axe y, une largeur b. p ne dépend de l'axe x.

Conditions aux limites :

$$\begin{cases} p = p_1 & (x = 0) \\ p = p_2 & (x = l) \end{cases}$$

Dans l'expression (1), le premier membre est fonction de x et le second membre fonction de z. Toutes deux sont des variables indépendantes. On tire de (1) :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} = C \quad \text{et} \quad \mu \cdot \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} = \mu \cdot \frac{d^2 V_x}{dz^2} = C$$

On intègre ces deux équations :

$$\begin{cases} p = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{l} \cdot x \\ V_x = \frac{C}{2 \cdot \mu} \cdot z^2 + C'z + C'' \end{cases}$$

Conditions aux limites : $V_x (z = 0) = V_x (z = e) = 0$ (viscosité)

$$V_x = \frac{p_2 - p_1}{2 \cdot \mu \cdot l} \cdot (z^2 - e \cdot z)$$

Calculons le débit q à travers la fissure pour la largeur b :

$$q = \int_0^e b \cdot v_x dz = b \cdot e \cdot \frac{e^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l}$$

Si N fissures parallèles existent sur une hauteur h de terrain par ailleurs impénétrable, la porosité de celui-ci sera :

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{N \cdot e \cdot b \cdot l}{h \cdot b \cdot l} = \frac{N \cdot e}{h}$$

La section totale de terrain $S = b \cdot h$ et le débit $Q = N \cdot q$

d'où :

$$Q = \frac{n \cdot e^2}{12} \cdot \frac{S}{\mu} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (4)$$

* Lien perméabilité/porosité :

En comparant (4) avec la loi de Darcy, il vient :

$$Q = k \cdot \frac{S}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} = \frac{n \cdot e^3}{12} \cdot \frac{S}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l}$$

$$k = \frac{n \cdot e^3}{12}$$

* Lien avec la surface spécifique :

Expression de la surface spécifique :

$$S_s = \frac{\text{Surface des pores}}{\text{Volume total}}$$

$$S_s = \frac{2 \cdot (e + b) \cdot l \cdot N}{b \cdot h \cdot l} = \frac{2 \cdot N}{h} \quad (e \ll b)$$

$$\text{Or } n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{N \cdot e \cdot b \cdot l}{h \cdot b \cdot l} \quad \text{d'où} \quad \frac{N}{h} = \frac{n}{e}$$

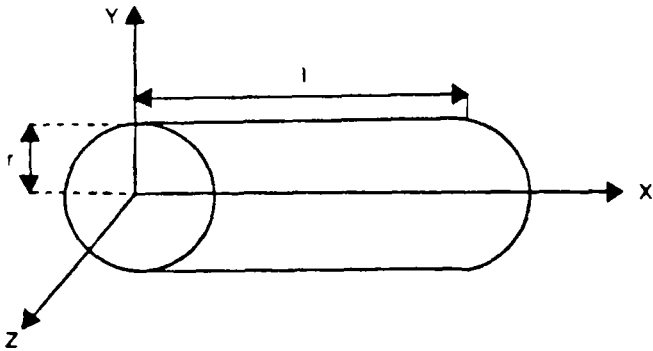
$$\text{Ainsi } S_s = \frac{2 \cdot n}{e}$$

$$e = \sqrt{\frac{12 \cdot k}{n}}$$

D'où :

$$S_s = \frac{n^{1/2}}{\sqrt{3} \cdot k^{1/2}}$$

2ème modélisation : écoulement dans un tube circulaire - application de la formule de Poiseuille.



On adopte les coordonnées polaires (pour exploiter la symétrie radiale), l'axe radial est celui de l'écoulement. Les équations de Navier-Stokes, compte tenu des hypothèses simplificatrices (régime permanent, fluide incompressible, absence de forces extérieures) s'expriment par la relation suivante :

$$\frac{dP}{dx} = \mu \cdot \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dV}{dr}$$

On intègre chaque équation, en notant P1 et P2 les pressions limites en $x = 0$ et en $x = l$, et en appelant r le rayon du cylindre :

$$P(x) = P1 + \frac{P2 - P1}{l} \cdot x$$

$$q = \frac{\pi \cdot r^4}{8} \cdot \frac{P1 - P2}{l}$$

Un milieu poreux constitué d'une matrice imperméable traversée de N canaux circulaires de rayon r , tous parallèles entre eux, a la porosité suivante :

$$n = \frac{N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l}{S \cdot l} = \frac{N \cdot \pi \cdot r^2}{S}$$

Le débit total du milieu poreux est alors : $Q = N \cdot q$

$$Q = S \cdot \frac{n \cdot r^4}{8} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{P1 - P2}{l}$$

* Lien porosité/perméabilité :

En identifiant le débit calculé à l'équation de Darcy, il vient :

$$K = \frac{n \cdot r^2}{8}$$

* Calcul de la surface spécifique :

Expression de la surface spécifique :

$$S_s = \frac{\text{Surface totale des pores}}{\text{Volume total}}$$

$$S_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot N}{\pi \cdot r^2 \cdot l} = \frac{2 \cdot N \cdot \pi \cdot r}{S}$$

$$\text{Or } \frac{N}{S} = \frac{n}{\pi \cdot r^2}$$

D'autre part :

$$\begin{cases} S_s = \frac{2 \cdot n}{r} \\ r = \sqrt{\frac{8 \cdot k}{n}} \end{cases}$$

d'où :

$$S_s = \frac{n^{3/2}}{\sqrt{2} \cdot k^{1/2}}$$

CARACTERISATION DES ALTERATIONS DU GRANITE D'AURIAT (CREUSE). ETUDE DE SON ESPACE POREUX.

RESUME : On se propose de caractériser les altérations du granite d'Auriat (Creuse) à partir d'un forage profond (1003.15 m). Ce mémoire comprend deux volets : la reconnaissance des altérations du granite puis l'analyse du milieu poreux.

Après une revue bibliographique, nous caractérisons le granite d'Auriat et ses altérations à partir des moyens classiques : étude visuelle du sondage, microscopie optique, MEB, diffraction de rayons X, analyses chimiques à l'échelle de la roche puis du minéral, microduretés Vickers, résistance à la compression et géophysique de laboratoire. Les faciès d'altérations que nous définissons à partir de la couleur des feldspaths (rubéfaction) correspondent à une réalité physico-chimique.

La seconde partie du mémoire débute par la mesure du volume poreux du granite. Une technique de mesure de la porosité à l'eau adaptée aux matériaux très peu poreux (moins de 2 %) est mise au point. La répartition des porosités en fonction des faciès montre que les granites sains sont très peu poreux (moins de 1 %) et les rubéfiés légèrement plus poreux (de 0 à 2 % en moyenne). La décomposition de la porosité totale en porosité de pores et de fissures montre que le faciès sain est affecté par un système de microfissures ouvertes. Les microfissures du granite rubéfié sont largement colmatées. L'essai de porosimétrie au mercure est abordé à partir des calculs utilisés en physique des hautes pressions. L'examen des courbes porosimétriques montre qu'il existe une infraporosité (de 0.001 à 0.01 microns) caractéristique du faciès rubéfié. Nous mesurons la perméabilité au gaz du granite, puis calculons sa surface spécifique à partir de la porosité et de la perméabilité. Enfin, nous présentons une synthèse des résultats et une prospective est envisagée.

Mots clés : granite, porosité, porosimétrie, perméabilité, altérations, feldspaths, microdureté Vickers, stockage, déchets radioactifs à haute activité.

CHARACTERIZATION OF THE WEATHERINGS OF THE AURIAT GRANITE (CREUSE). STUDY OF ITS POROUS SPACE.

ABSTRACT : Our aim has been to characterize the alterations of the Auriat granite (Creuse) from a deep drilling. The two main parts of this memoir are : alterations prospecting and the analysis of the porous medium.

After bibliographic review, we have characterized the Auriat granite and its alterations with classical methods : visual study, optical microscopy, MEB, Vickers micro-hardness, chemical analyses (scales of rock and grain), uniaxial compression and seismic velocities measurement in laboratory. We have defined alteration facies starting from the feldspar colors (rubefaction) that correspond to a physico-chemical reality.

The second part of the memoir starts with the measurement of the granite porous volume. We have developed a technique adapted to the measurement of very low porosities (less than 2 %). The distribution of the porosities in relation with the facies shows that fresh granite has very low porosity (less than 1 %) and weathered (rubefied) granite is slightly more porous (from about 0 to 2 %). The decomposition of the global porosity in "pore porosity" and "crack porosity" shows that the fresh facies is affected by a set of open cracks. The rubefied facies presents widely clogged micro-cracks. We have taken up the mercury injection porosimetric test from the calculi used in the physic of high pressure. The study of porosimetric curves shows the existence of an infra-porosity (from 0.001 to 0.01 microns) for the rubefied facies. We have measured the gas permeability of the granite, then we have computed specific areas starting from porosity and permeability. Finally, we have presented a synthesis and the envisaged prospects.

Key words : granite, porosity, porosimetry, permeability, weatherings, feldspars, Vickers micro-harness, storage, high level radioactive wastes.